Chapitre 1

ÉTAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Sommaire

1.1 L'altimétrie radar depuis 1978 20
1.1.1 Historique 20
1.1.2 Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir 20
1.1.3 Un aperçu des missions d'altimétrie radar 24
1.1.4 L'altimétrie satellitaire radar pour l'étude des océans 29
1.1.5 Altimétrie radar et hydrologie continentale 32
1.2 Difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales . . 35
1.2.1 Physique de la mesure et difficultés sur les eaux continentales 35
1.2.2 Corrections des mesures altimétriques 36
1.3 Caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales 38
1.3.1 Méthodes d'évaluation de la précision des mesures altimétriques 40
1.3.2 Techniques de « retracking » 42
1.4 Objet et objectifs de la thèse 44
1.4.1 Contexte général de la thèse 44
1.4.2 Précision, incertitude, échantillonnage et applications des mesures altimétriques 44
1.4.3 Objectifs de la thèse 46
1.4.4 Contexte de déroulement de la thèse 46

1.1 L'altimétrie radar depuis 1978

1.1.1 Historique

L'altimétrie satellitaire radar a vraiment connu ses débuts[1] le 28 juin 1978 avec le lancement du satellite Seasat (Seasat-A), développé par le JPL[2] (Jet Propulsion Laboratory, NASA). Le but de cette première mission était non seulement de démontrer la possibilité d'observer les océans -au travers notamment de la mesure de leur hauteur, température de surface et hauteur des vagues- depuis l'espace à une altitude de 800km, mais également de définir les besoins pour les futures missions opérationnelles de suivi des océans. La mission fut malheureusement très courte, puisque 105 jours après son lancement, un court circuit important à bord de Seasat mit fin à cette première expérience.

Depuis, de nombreuses missions - à composante altimétrique ou dédiées - ont vu le jour (cf. figure 1.1). Nous pouvons citer les missions ERS-1 et ERS-2, GeoSAT, GFO, Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2 et ENVISAT.

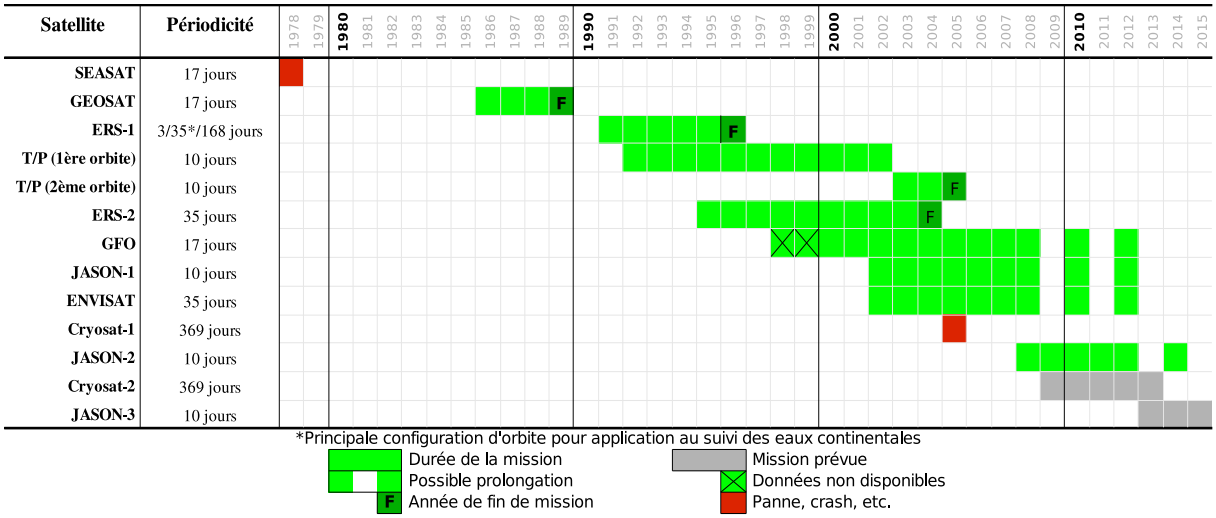

Satellite
Périodicité
SEASAT 17 jours
GEOSAT 17 jours
ERS-1 3/35*/168 jours
T/P (1ère orbite) 10 jours
T/P (2ème orbite) 10 jours
ERS-2 35 jours
GFO 17 jours
JASON-1 10 jours
ENVISAT 35 jours
Cryosat-1 369 jours
JASON-2 10 jours
Cryosat-2 369 jours
JASON-3 10 jours
1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015
*Principale configuration d'orbite pour application au suivi des eaux continentales
Durée de la mission
Possible prolongation
F Année de fin de mission
Mission prévue
Données non disponibles
Panne, crash, etc.

FIG. 1.1: Chronologie des principales missions altimétriques de 1978 à nos jours et à venir.

A cette liste s'ajoutent ICESat (altimétrie LIDAR) ainsi que les projets des missions , Siral et WATER/SWOT.

Les premières exploitations de l'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales ont été initiées entre la fin des années 80 et le début des années 90 avec notamment les travaux de [Rapley et al., 1987], [Guzkowska et al., 1990] et [Koblinsky et al., 1993]. A cette même époque de nombreux travaux sur la mesure de topographie des surface émergées ont vu le jour : mesures du relief, citons notamment [Rapley et al., 1987], [Frey et Brenner, 1990] et [Brenner et al., 1993] (données SeaSAT) ; et études des surfaces de glace avec [Zwally et al., 1989] et [Zwally, 1989]. Ces travaux peuvent être rapprochés des applications en hydrologie continentale en ce sens qu'ils ont permis de valoriser les données altimétriques sur les surfaces continentales.

1.1.2 Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir

Nous allons, dans cette section, brièvement rappeler quelques points essentiels sur le principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir.

[1] D'autre missions à composante altimétrique ont vu le jour avant la mission Seasat (dont GEOS-3), mais celle-ci se différenciait de ses prédécesseurs par le fait que la plateforme de Seasat incorporait des capteurs micro-ondes actifs et passifs qui permettaient l'acquisition de mesures quelques soient les conditions météo.

[2] Voir la page du site web du JPL : *http://www.jpl.nasa.gov/missions/past/seasat.html*.

Orbitographie : caractéristiques orbitales et géolocalisation des satellites

Couverture géographique quasi-globale et répétitive La plupart des missions altimétriques passées et actuelles sont placées sur une orbite bien précise, optimisée pour observer au mieux les phénomènes naturels. Ces orbites, en forme de maillage, présentent un compromis entre la densité spatiale des traces (projection de l'orbite au sol, cf. section 2.1.2) et leur périodicité.

Parmi les caractéristiques orbitales, deux paramètres vont particulèrement nous intéresser pour le suivi des eaux continentales :

– la distance inter-traces à l'équateur, paramètre de la densité du maillage de la couverture spatiale des traces,
– la période de répétition de l'orbite, qui est directement égale à la période d'échantillonnage des mesures altimétriques sur un site donné.

La figure 1.2 illustre les traces des orbites d'une part des satellites Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2 et d'autre part des satellites ERS-1/2 et ENVISAT. On constate que le second maillage est beaucoup plus dense, ce qui se traduit par une période d'échantillonnage plus longue.

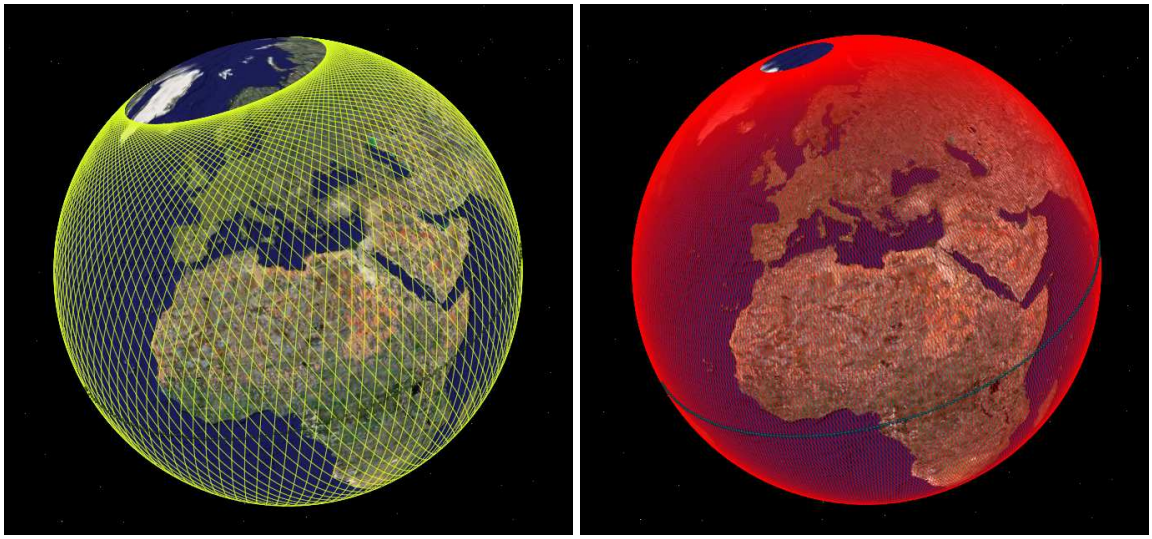


FIG. 1.2: Illustration de la couverture (à gauche) des missions altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, et (à droite) des missions altimétriques ERS-1/2 et ENVISAT.
L'orbite de Topex/Poseidon présente une distance intertrace à l'équateur de 315km (inclinaison de $66,039°$) et une périodicité de $9,9156$ jours. L'orbite de ERS-2 présente une distance intertrace à l'équateur de 79km (inclinaison de $98,55°$) et une périodicité de 35 jours.

Dans certains cas, un même satellite a pu être placé successivement sur différentes orbites : c'est le cas par exemple de ERS-1 qui a été exploité sur trois orbites différentes (de périodicité de 3, 35 ou 168 jours) ou encore de Topex/Poseidon qui a été déplacé en 2002 sur une seconde orbite (de même périodicité) à l'intertrace de la première pour laisser place à son successeur Jason-1 (cf. figure 1.7).

Géolocalisation des satellites L'orbitographie est l'un des aspects les plus importants de l'exploitation des satellites en général. Pour l'altimétrie radar nadir, une connaissance précise de l'orbite des altimètres est indispensable. En effet, l'incertitude sur le positionnement vertical de l'altimètre va se reporter directement dans le bilan d'erreur des mesures altimétriques.

Les systèmes de positionnement des missions altimétriques actuelles sont d'une très grande précision (quelques centimètres), mais cela n'a pas toujours été le cas. Le figure 1.3 donne un aperçu de l'évolution des gammes d'incertitude sur l'orbite pour les principales missions altimétriques des années passées et présentes.

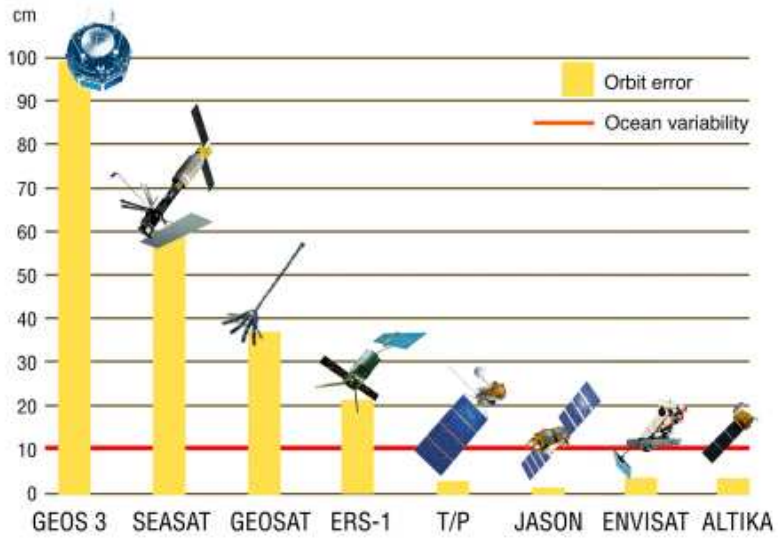


FIG. 1.3: Précision des orbites des principales missions satellitaires d'altimétrie radar nadir.

Mesure au nadir

La mesure de la distance au nadir entre l'antenne de l'altimètre et la surface terrestre s'effectue par la mesure du temps de propagation aller-retour d'une onde radar. Une partie de l'onde radar réfléchie au niveau de la surface terrestre est reçue et enregistrée par l'altimètre. La forme de cette onde (enregistrée au cours du temps) est conditionnée par la topographie de la surface terrestre et ses caractéristiques de rétrodiffusion (absorption et réflection).

La figure 1.4 illustre de manière détaillée le processus mis en œuvre pour la mesure du temps de propagation ΔT d'une onde radar de l'antenne de l'altimètre à la surface terrestre.

L'estimation du temps moyen de propagation aller-retour $2.\Delta T$ de l'onde radar est une opération qui peut s'avérer difficile. En effet, comme nous venons de le voir en figure 1.4, la forme de l'écho de l'onde radar enregistrée par l'altimètre est directement conditionnée par les caractéristiques de forme et de rétrodiffusion de la surface éclairée.

Tout l'enjeu de la mesure altimétrique va alors résider dans l'estimation du temps moyen de propagation aller-retour $2.\Delta T$, par analyse de la forme de l'écho radar. D'une manière très générale, on recherche dans cette forme d'onde l'intant t_{2R} correspondant à la mi-hauteur du front de montée de la puissance reçue par l'altimètre (soit d'après les explications données en figure 1.4 juste après t_3 et avant t_4).

La durée $t_{2R} - t_0$ correspondant au temps aller-retour de l'onde radar entre l'altimètre et la surface au nadir, le temps de propagation ΔT de l'onde radar s'écrit :

$$\Delta T = \frac{t_{2R} - t_0}{2}$$

La distance déduite de la durée ΔT est appelée le « range » (cf. § 2.1.2), et noté r :

$$r = \Delta T.c$$

avec : c la célérité de propagation de l'onde (m/s).

Calcul de l'altitude des surfaces d'eau

L'altitude moyenne du plan d'eau observé par un satellite altimètre est égale à la différence entre l'altitude du satellite[3] et la valeur du range (déduite du temps moyen aller-retour de l'onde radar). Généralement, la valeur de range doit être corrigée des effets de ralentissement de la vitesse de propagation

[3]Ou plus précisément l'altitude de l'antenne de l'altimètre dans l'ellipsoïde de référence utilisé par le satellite

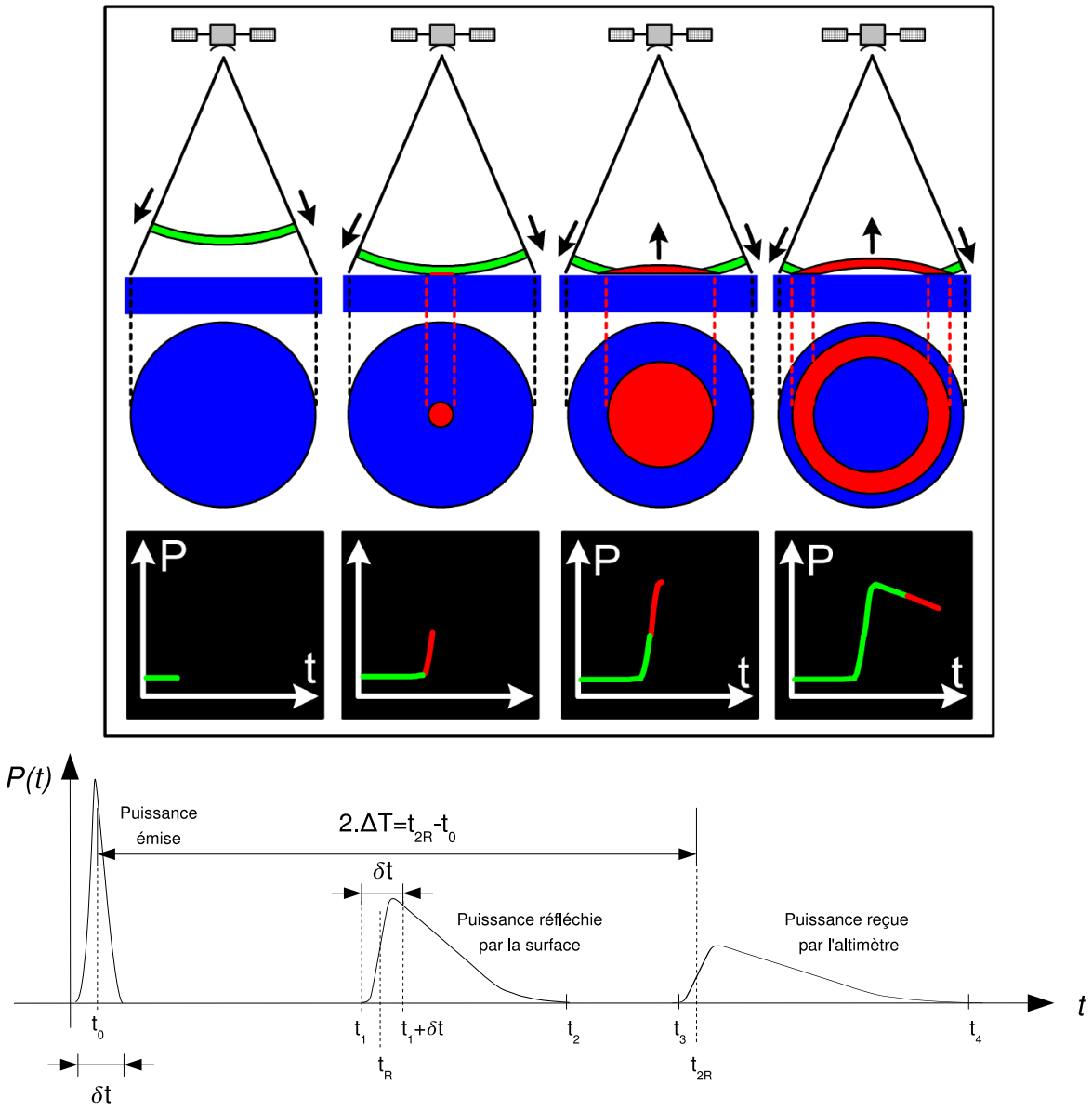


FIG. 1.4: Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchie par la surface au nadir (en haut, d'après un document CNES) et de l'onde radar reçue par l'altimètre (en bas).
- En haut, de gauche à droite : (1) A l'instant t_0, l'onde radar est émise par l'altimètre sous la forme d'une impulsion de durée très courte (δt) en direction de la surface terrestre (au nadir). Elle est matérialisée par un faisceau divergent dont le front d'onde est une portion de sphère. (2) A l'instant t_1, le front d'onde rencontre les premiers éléments de la surface terrestre et l'éclaire d'une tâche circulaire. La puissance P réfléchie vers l'altimètre commence à croître : l'écho de l'onde radar (ou « forme d'onde ») commence à se former. (3) La tâche circulaire croît pendant le laps de temps $[t_1 \, ; t_1 + \delta t]$, de même que la puissance réfléchie vers l'altimètre. (4) Après l'instant $t_1 + \delta t$, les parties extérieures du front d'onde éclairent la surface terrestre en prenant la forme d'un anneau dont le rayon va augmenter jusqu'à atteindre un diamètre nominal ; La puissance P réfléchie vers l'altimètre décroît jusqu'à l'instant t_2.
- En bas : L'altimètre reçoit cette puissance réfléchie à partir de t_3, après un laps de temps lié au trajet retour. La mesure se termine à t_4 (cf. chronogramme ci-dessous). La détermination de $\Delta T = \frac{t_{2R}-t_0}{2}$ permettra d'estimer la distance entre l'altimètre et la surface.

Cet exemple illustre le processus de la mesure altimétrique au nadir sur une surface terrestre plane. Dans le cas des océans ou des eaux continentales, la surface à mesurer présentera des structures non régulières (vagues, relief, etc.). Ceci aura pour effet de complexifier la forme de l'écho radar enregistrée par l'altimètre et donc de rendre plus difficile son interprétation *a posteriori* pour en déduire t_{2R} (avec $t_3 < t_{2R} < t_4$) et ΔT.

de l'onde radar dans les différentes couches de l'atmosphère [Escudier et al., 2001; Mercier et Zanife, 2006]. On obtient alors une mesure altimétrique de l'altitude du plan d'eau, exprimée dans le référentiel altimétrique de l'ellipsoïde de référence du satellite.

Pour ramener les mesures de niveau à un référentiel pertinent d'un point de vue hydrologique, il convient de translater les hauteurs ellipsoïdales en hauteurs orthométriques à l'aide d'un modèle du géoïde terrestre (cf. § 3.6.3).

La figure 1.5 illustre et résume de manière schématique les éléments nécessaires à la construction d'une mesure de l'altitude d'un plan d'eau : l'orbitographie, le positionnement du satellite, la mesure du range et l'expression des mesures altimétriques dans des référentiels ellipsoïdaux ou géodésiques[4].

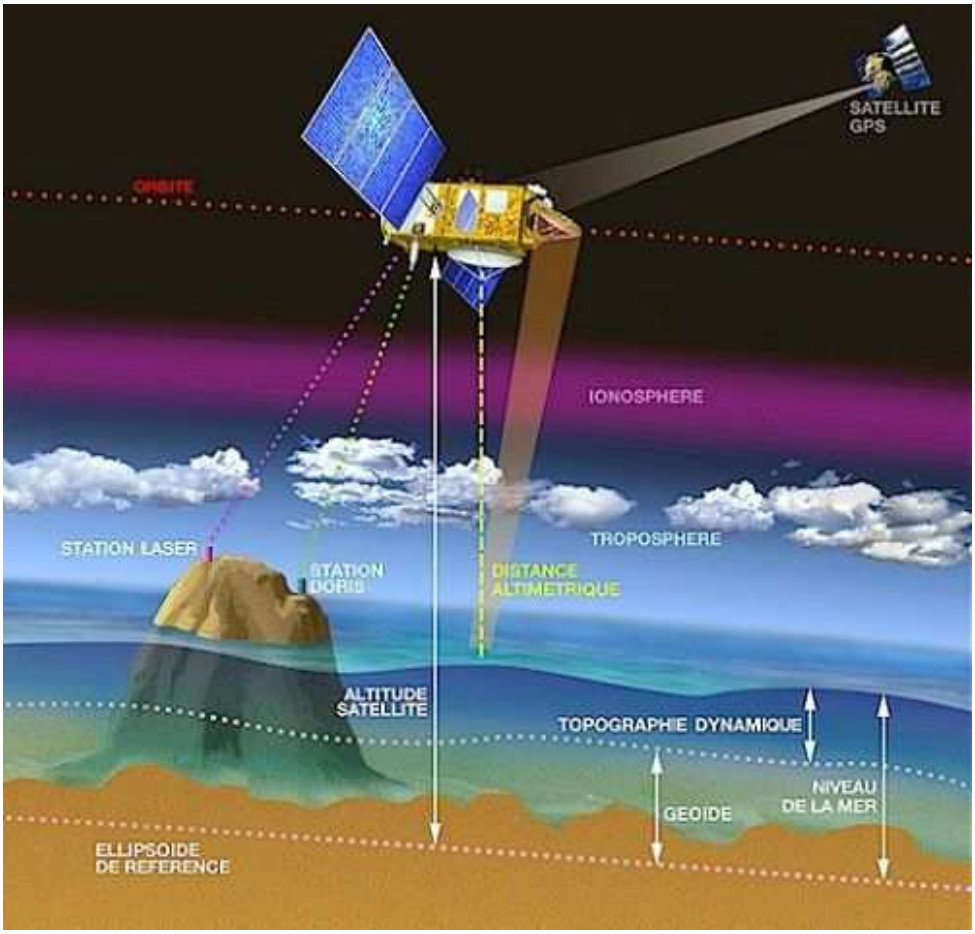


FIG. 1.5: Principe de l'altimétrie satellitaire radar nadir. Le satellite est localisé dans l'espace avec une très grande précision à l'aide de systèmes de localisation très précis (GPS, DORIS, interférométrie laser). L'onde radar est envoyée au nadir du satellite, l'écho radar ainsi réfléchi à la surface de l'eau est analysé par l'algorithme embarqué dit de "tracking" pour en déduire la distance satellite-plan d'eau. On en déduit la distance du plan d'eau à l'ellipsoïde. Enfin, cette distance peut être traduite en hauteur dans un système géodésique de type géoïdal. (Document CNES)

1.1.3 Un aperçu des missions d'altimétrie radar

Topex/Poseidon (1992-2005)

Topex/Poseidon est né d'un partenariat entre le CNES et la NASA. De 1992 à 2005, il a permis de suivre de manière très précise le niveau moyen des océans, de mesurer la hauteur des vagues, de com-

[4]La construction effective d'une mesure altimétrique directement exploitable fait l'objet d'une présentation plus détaillée au chapitre 3, section 3.6 (page 81).

prendre le rôle des marées et les variations des courants océaniques, de suivre les phénomènes climatologiques à l'échelle globale (El Niño/La Niña) ou encore de cartographier les fonds marins.

Lancé en août 1992, Topex/Poseidon embarque deux altimètres : TOPEX ou NRA (NASA Radar Altimeter, [Zieger et al., 1991]) et Poseidon (CNES) qui se partageront le temps de mesure à hauteur de 90% et 10% respectivement, Poseidon étant un altimètre expérimental [Phalippou et al., 2006]. De 1992 à 2002, Topex/Poseidon est placé sur une orbite d'une périodicité de 10 jours (un peu moins en réalité) optimisée pour éviter le sous-échantillonnage des signaux de la marée océanique. Durant les mois d'août et septembre 2002 (et suite au lancement de son successeur Jason-1), Topex/Poseidon est placé sur une orbite à l'intertrace de son orbite d'origine. Topex/Poseidon sera mis hors service et placé sur une orbite « cimetière » aux alentours de novembre 2005 après avoir servi plus de 13 années, soit 8 années de plus que ce qui était prévu lors de son lancement.

FIG. 1.6: Le satellite altimètre Topex/Poseidon. (Document CNES)

Les produits altimétriques issus de la mission Topex/Poseidon (principalement AVISO et PODDAC) ont fait l'objet de nombreuses utilisations dans le cadre de recherches pour le suivi des eaux continentales sur des mers intérieures, des lacs et des grands fleuves du globe (cf. section 1.3).

Enfin, la figure 1.7 illustre la couverture des traces des deux orbites de Topex/Poseidon sur l'Europe occidentale.

Jason-1 (2001 à nos jours)

Le 7 décembre 2001, le satellite Jason-1 est lancé et placé sur la même orbite que son prédécesseur Topex/Poseidon. La mission Jason-1 permet d'assurer la continuité des mesures pour le suivi des océans pour les cinq années à suivre. Il embarque à son bord l'altimètre Poseidon 2 (CNES, cf. figure 1.9), successeur de l'altimètre Poseidon de Topex/Poseidon.

Topex/Poseidon ayant été déplacé, courant 2002, sur une orbite complémentaire à celle de Jason-1, il a été possible pendant trois années d'obtenir des mesures sur les océans avec une densité deux fois plus importante. Cette couverture est illustrée à la figure 1.7.

Malheureusement, les spécificités de Poseidon 2 ne permettent pas d'exploiter ses mesures de manière satisfaisante sur les eaux continentales [Enjolras, 2007].

La figure 1.8 présente une image du satellite Jason-1 et la figure 1.9 présente une photo de l'altimètre Poseidon 2 monté sur la plateforme du satellite.

Jason-2 (2008 à nos jours)

Le 20 juin 2008, le satellite Jason-2 est lancé et placé sur la même orbite que Jason-1, à moins d'une minute à peine l'un de l'autre. Il embarque à son bord l'altimètre Poseidon 3 (CNES), successeur des alti-

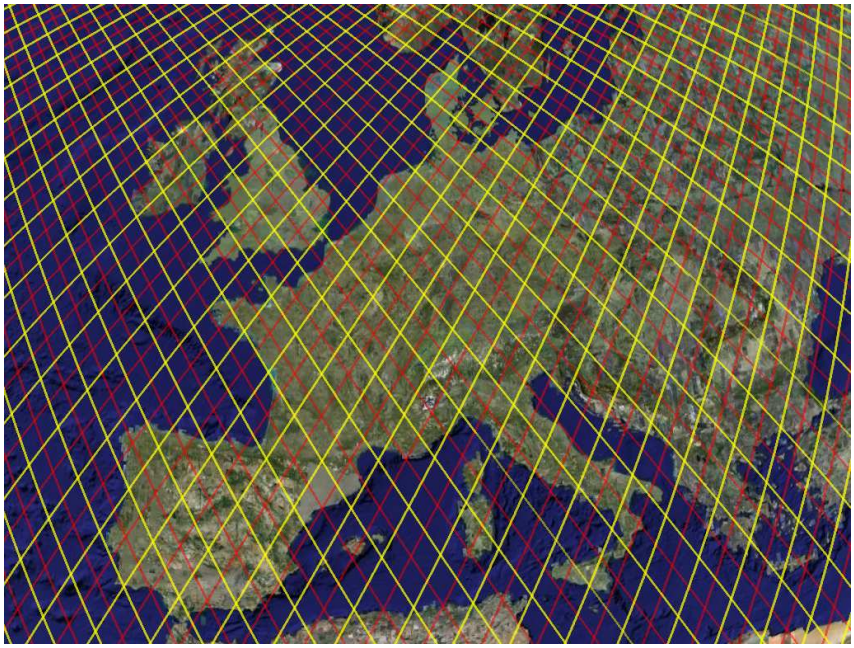


FIG. 1.7: Traces des deux orbites de Topex/Poseidon pour les périodes 1992-2002 (traits jaunes) et 2002-2005 (traits rouges). (Fond d'image GoogleEarth)

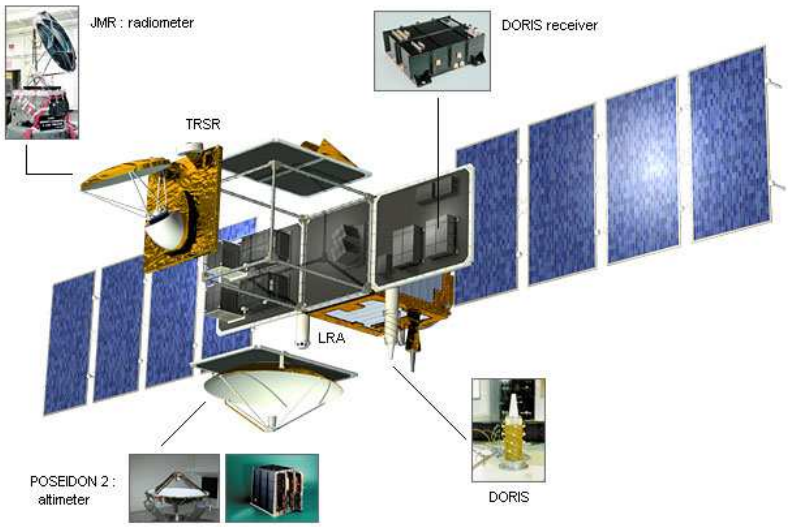


FIG. 1.8: Le satellite altimètre Jason-1. (Document CNES)

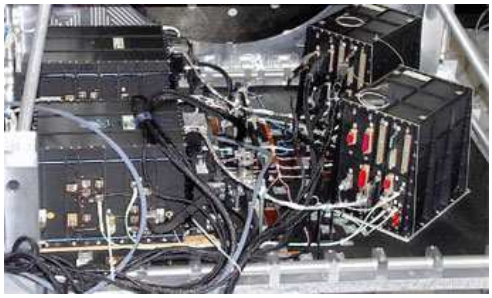


FIG. 1.9: L'altimètre Poseidon 2 qui équipe Jason-1. (Document CNES)

mètres Poseidon 2 de Jason-1 et Poseidon de Topex/Poseidon. Une fois de plus, Jason-2 permet d'assurer la continuité des mesures pour le suivi des océans pour cinq années supplémentaires.

La figure 1.10 présente une photo du satellite satellite Jason-2 le jour de son lancement, quelques secondes après sa séparation de son lanceur Delta 2.

FIG. 1.10: Le satellite altimètre Jason-2, le 20 juin 2008, quelques secondes après avoir été séparé de son lanceur Delta 2. (Pour un aperçu du satellite Jason-2, voir la figure 1.8 qui illustre son aîné et presque jumeau Jason-1). (Document CNES/NASA)

ERS-1 (1991-1996) et ERS-2 (1995 à nos jours)

Les satellites ERS-1/2 (« European Remote Sensing »), projets de l'ESA (Agence spatiale Européenne), ont pour mission d'observer la Terre, en particulier l'atmosphère et les océans. ERS-1 a été lancé au mois de juillet 1991 et a été en service jusqu'en juin 1996. Il ne consiste pas seulement en une mission altimétrique, il embarque également un radar imageur de type SAR (Synthetic Radar Aperture).

Afin d'observer différents phénomènes, ERS-1 a été placé sur différentes orbites :

– une orbite répétitive à 3 jours pour l'observation des calottes polaires,
– une orbite répétitive à 35 jours (orbite principale d'ERS-1) pour plusieurs applications dont l'observation des océans,
– une orbite répétitive à 168 jours pour les applications géodésiques.

La figure 1.11 présente un schéma du satellite ERS-1 et de ses instruments.

Son successeur a été lancé le 21 avril 1995. Ainsi pendant une période d'une année environ, les deux satellites ERS-1 et ERS-2 ont travaillé en tandem. ERS-2 embarque en plus d'un altimètre et d'un radar SAR, un instrument pour l'étude de l'ozone dans l'atmosphère.

ERS-2 a connu plusieurs pannes importantes en 2000 et 2001 mais il est toujours en service. Son fonctionnement est restreint car il n'est plus en capacité de stocker les mesures qu'il acquiert : il est donc utilisable en « temps-réel », c'est à dire lorsqu'une station de réception terrestre permet de recevoir ses données en direct.

La figure 1.12 présente une illustration du satellite ERS-2.

ENVISAT (2002 à nos jours)

Le satellite ENVISAT (pour « Environmental Satellite »), est le successeur des missions ERS-1 et ERS-2. Il a été conçu pour l'observation de l'environnement et en particulier pour le suivi des chan-

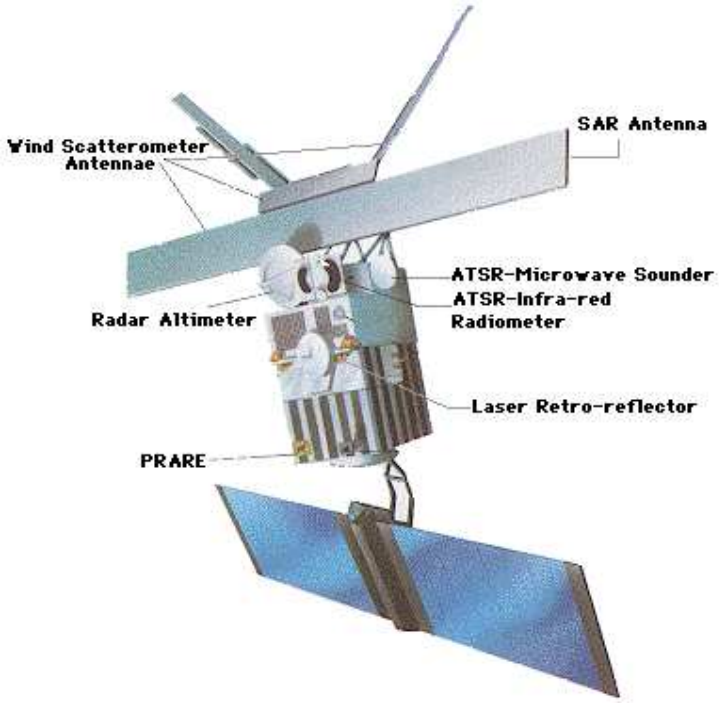


FIG. 1.11: Schéma d'ensemble du satellite ERS-1 et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

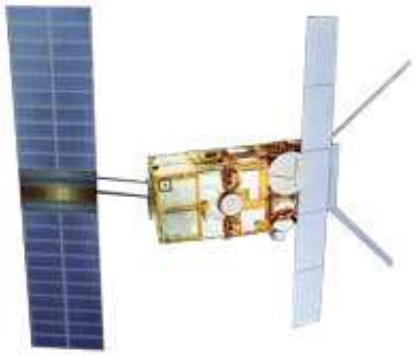


FIG. 1.12: Schéma d'ensemble du satellite ERS-2 et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

gements climatiques. ENVISAT suit la même orbite que ERS-1 et ERS-2 avec une périodicité de 35 jours.

Parmi les 12 capteurs embarquées sur ENVISAT on compte un altimètre (RA-2), un imageur (MERIS) et une antenne SAR. La figure 1.13 présente un schéma d'ensemble satellite ENVISAT sur lequel sont indiqués les différents instruments.

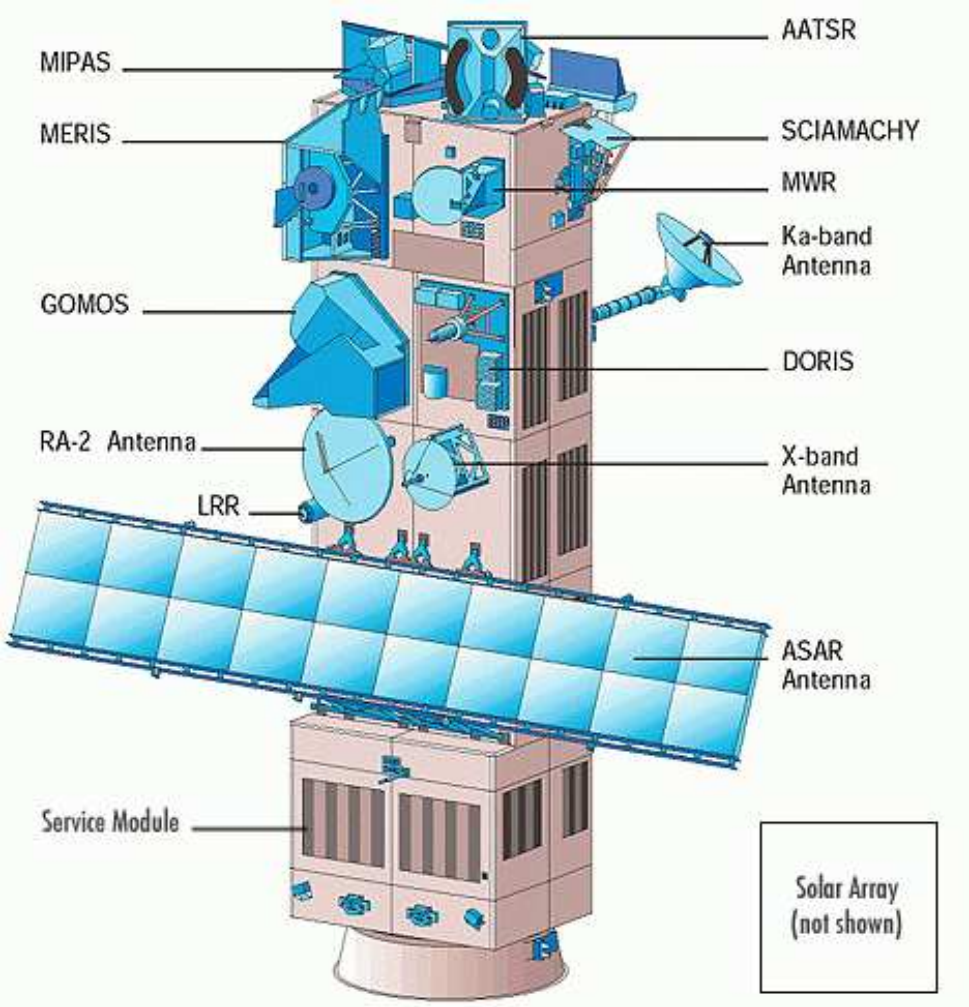


FIG. 1.13: Schéma d'ensemble du satellite ENVISAT et de ses instruments de mesures. (Document ESA)

1.1.4 L'altimétrie satellitaire radar pour l'étude des océans

Depuis plus de quinze ans, les rapides progrès des techniques de l'altimétrie satellitaire radar ont permis de mener des travaux scientifiques d'une grande variété et d'un intérêt capital pour le suivi du cycle de l'eau et la compréhension de phénomènes climatiques à l'échelle globale.

Jusqu'ici, les acquis majeurs de l'altimétrie radar concernent les surfaces océaniques. Cette technologie a permis de quantifier la distribution spatiale du niveau des océans [Marsh et al., 1986; Mercier et al., 2002] ainsi que son évolution temporelle [Cabanes et al., 2001].

Nous présentons dans cette section quelques applications de l'altimétrie satellitaire radar à l'observation et l'étude des océans[5].

[5]Nous ne visons pas ici un paysage exhaustif des travaux réalisés mais une illustration de quelques avancées représentatives dans le domaine.

Anomalies topographiques

Le satellite Topex/Poseidon a largement contribué à l'étude des océans grace au nombre colossal de données qu'il a pu founir (plus de 4.10^9 mesures aquises en treize années de service). Topex/Poseidon a notamment permis d'observer les phénomènes El Niño et La Niña (1997-1998) considérés comme les plus importantes anomalies jamais observées sur les océans [Cazenave et Nerem, 2002; Cox et Chao, 2002]. Les cartes d'anomalies de la hauteur des océans présentées en figure 1.14 illustrent clairement ces phénomènes.

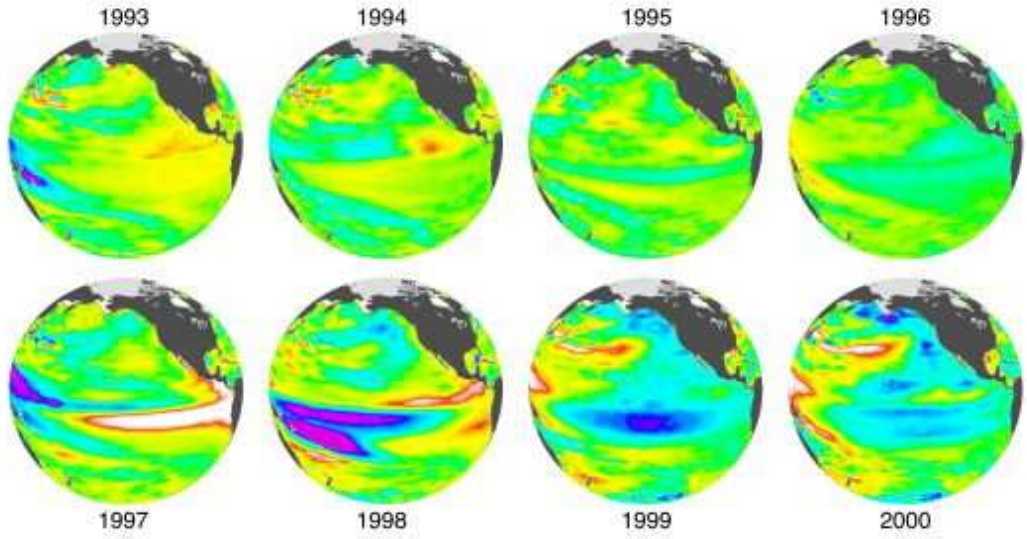


FIG. 1.14: Moyennes annuelles de la topographie de l'océan Pacifique, dérivée des mesures de Topex/Poseidon (période 1993-2000), représentées en anomalie par rapport à la moyenne inter-annuelle. Les hauts niveaux liés à l'expansion océanique (en blanc) générés par l'épisode El Niño de 1997 dans la partie orientale du Pacifique équatorial sont remplacés en 1998-1999 par les anomalies négatives (en bleu) liées à La Niña. (Crédit JPL/NASA)

Niveau moyen des océans

La montée du niveau global des océans est une des conséquences importantes du changement climatique. Ce phénomène a pu être observé et étudié de manière continue grace aux données fournies par les missions Topex/Poseidon (1992-2005) et Jason-1 (2001 à nos jours). Le bilan de ces études [Cazenave et al., 1998; Cazenave, 1999; Fu et Cazenave, 2001; Lombard et al., 2005; Nerem et al., 2006] indique une montée moyenne du niveau des océans de l'ordre de $3\text{mm}/\text{an}$. La figure 1.15 présente la carte des variations du niveau moyen annuel du niveau des océans du globe en 15 ans, entre octobre 1992 et avril 2007. On peut y observer majoritairement un phénomène de montée des eaux, mais aussi quelques zones de diminution du niveau moyen.

Topographie dynamique

Le couplage des données mesurées par Topex/Poseidon, par le satellite CHAMP[6] et des mesures issues de bouées hydrologiques a permis d'observer les variations topographiques des océans (topographie dynamique) et d'en dériver des cartes de vitesse des courants marins de surface dont l'interaction avec

[6]Le satellite gravimétrique CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload), fruit d'une collaboration entre le DLR (Centre Aérospatial Allemand), le CNES et le JPL et développé par Astrium, est une mission géo-scientifique qui a pour objectif l'étude des champs gravitationnel et magnétique terrestres. Il a été lancé en mai 2000.

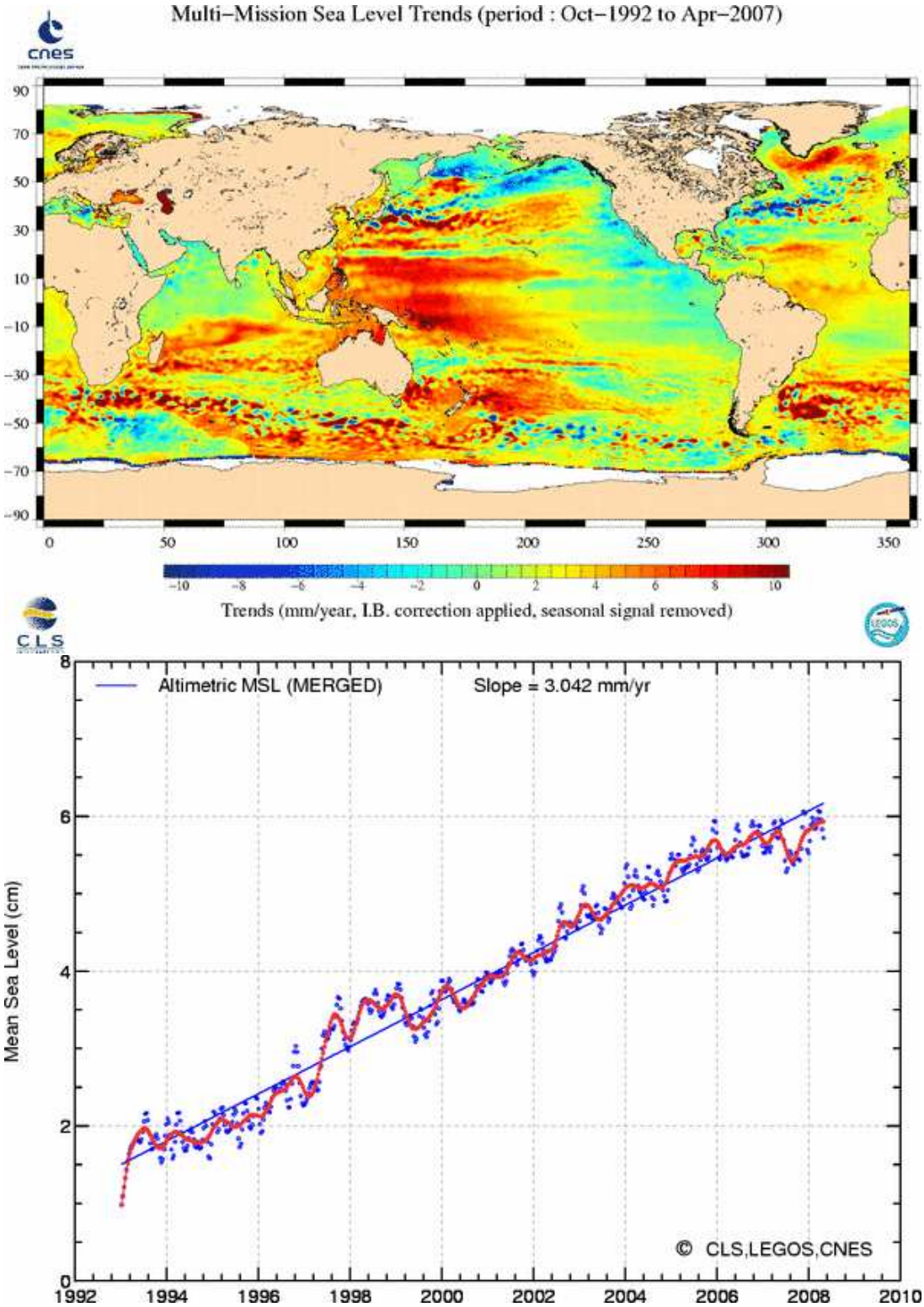


FIG. 1.15: Niveau moyen global des océans observé depuis octobre 1992 d'après les données fusionnées issues de plusieurs satellites altimétres. (Crédits CLS/LEGOS)

le climat global est importante du fait de leur rôle de convecteur de l'énergie thermique [LeGrand et al., 1998, 2003; Rio et Hernandez, 2004] (voir figure 1.16).

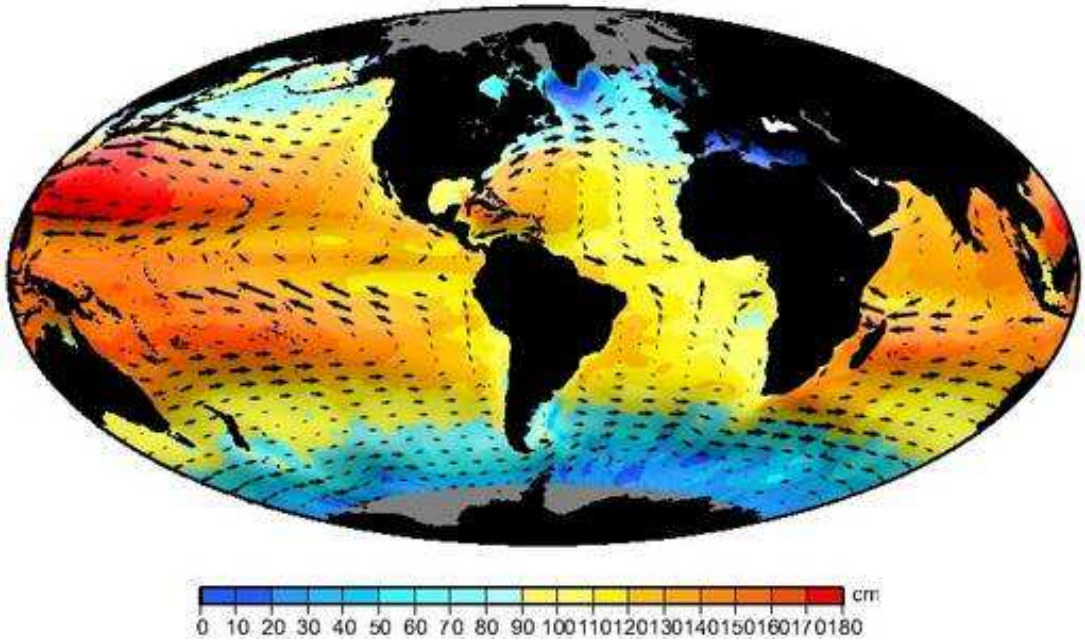


FIG. 1.16: Carte de la topographie dynamique des océans (fond coloré) et des courants marins de surface (flèches noires). (Crédit CLS)

1.1.5 Altimétrie radar et hydrologie continentale

Les différentes missions d'altimétrie radar, initialement destinées (pour la plupart) à l'observation des océans, ont vite montré un potentiel prometteur pour l'observation des eaux continentales. Ce potentiel s'est notamment révélé en raison des caractéristiques de couverture spatiale (quasi-globale) et de périodicité temporelle[7] proposées par les différentes missions altimétriques, qui s'avèrent adaptées à l'observation des terres émergées. Du fait de sa couverture et de son haut taux de disponibilité, l'altimétrie radar constitue une importante source de données pour le suivi des eaux continentales, susceptible d'apporter une connaissance inédite (ou jusqu'alors difficilement accessible), et complémentaire des données in-situ, sur un grand nombre de cibles hydrologiques[8].

Les applications de cette technique se sont déclinées, au fil des recherches, à différentes échelles géographiques et ont permis l'étude de mers intérieures [Aladin et al., 2005], de lacs [Birkett, 2000; Crétaux et Birkett, 2006] puis de grands fleuves du globe [Mercier, 2001; De Oliveira Campos et al., 2001; Maheu et Cazenave, 2003; Kosuth et al., 2006].

Parmi les domaines d'application les plus importants, nous pouvons citer le suivi à grande échelle du cycle continental de l'eau, le suivi temporel des régimes hydrologiques sur les bassins fluviaux, l'analyse de phénomènes hydrauliques (pentes, propagation de crues, etc.), l'estimation du débit des cours d'eau (cf. rétrospective [Calmant et Seyler, 2006]) et l'appui à la modélisation hydrodynamique.

Nous présentons dans cette section les principaux travaux en la matière avant d'aborder de façon plus détaillée dans la section suivante les aspects liés à la caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales.

[7] Selon l'orbite adoptée, la couverture spatiale est plus ou moins dense avec une distance inter-trace à l'équateur de 79 à 315km, et une périodicité temporelle, inversement proportionnelle, de 35 à 10 jours.

[8] Cibles pour lesquelles l'acquisition de mesures par voie terrestre peut s'avérer difficile (inaccessibilité, manque d'équipement de mesure, conflit civil, etc.).

Pour de plus amples détails sur l'altimétrie satellitaire en général et ses applications en hydrologie, le lecteur pourra en particulier se reporter à la thèse de Franck Mercier [Mercier, 2001] qui constitue une excellente synthèse en la matière.

Les mers intérieures et les grands lacs

Les conditions d'acquisition des mesures altimétriques sur les lacs et les mers intérieures sont similaires aux conditions océaniques, pour peu que la section survolée du plan d'eau soit de longueur suffisante[9].

Les premiers travaux exploitant les mesures altimétriques sur des lacs ont porté sur les grands lacs du nord américain particulièrement bien équipés en stations de mesures liminimétriques et où la comparaison entre mesures altimétriques et mesures in-situ est possible. Plusieurs missions altimétriques ont fait l'objet de publications sur ces lacs avec les données des satellites SeaSAT [Brooks2002, 1982], GeoSAT [Morris et Gill, 1994b] et Topex/Poseidon [Morris et Gill, 1994a]. Ces premiers travaux ont eu une vocation démonstrative du potentiel de l'altimétrie radar sur les continents.

Au fil des investigations, les données altimétriques ont été utilisées de manière plus applicative et ont permis de repérer [Birkett et Mason, 1995] puis de suivre les variations des niveaux de nombreux lacs [Birkett, 1995]. Notons que certaines études signalent la possibilité d'imprécisions notoires dans les modèles de géoïde utilisés pour restituer les mesures altimétriques en hauteurs orthométriques [Cheng et al., 2008].

Enfin, un certain nombre d'études à finalité hydrologique se sont penchées sur les lacs et les mers intérieures dont les ressources en eaux s'affaiblissent de manière inquiétante. C'est par exemple le cas du lac Tchad [Birkett, 2000; Crétaux et al., 2005; Aladin et al., 2005] et de la mer d'Aral [Crétaux et Birkett, 2006] dont l'assèchement accéléré semble être lié aux pressions exercées par les activités humaines et/ou aux effets du changement climatique.

Les grands cours d'eau

L'exploitation des données issues de l'altimétrie radar sur les lacs a montré que les altimètres avaient les capacités, sous certaines conditions, d'acquérir de la mesure sur les eaux continentales. Les investigations menées sur les grands cours d'eau du globe présentent un double intérêt :

- elles permettent de caractériser le potentiel de l'altimétrie radar sous différentes conditions hydrologiques et morphologiques (largeur de fleuve, dénivelé par rapport au relief environnant),
- elles apportent une connaissance originale sur ces grands fleuves.

Dans ce cadre général, le bassin amazonien, ses fleuves et ses zones d'inondation, ont été l'objet d'une attention toute particulière, ceci pour au moins trois raisons : (1) le bassin amazonien constitue la plus importante réserve en eau douce du globe et sa biomasse est d'un intérêt capital pour l'équilibre de l'éco-système de la planète ; (2) les fleuves du bassin amazonien sont de dimensions (largeurs) propices à la validation des mesures altimétriques sur une grande diversité de cibles ; (3) le bassin amazonien est équipé d'un réseau de stations limnimétriques suffisamment dense pour permettre la comparaison directe, sur un nombre plus ou moins important (dépendant de la couverture satellitaire) de sites, entre les mesures altimétriques et in-situ, les données produites par l'ANA (Agência Nacional de Águas, Brésil, *http://www.ana.gov.br*) sont en accès libre.

De nombreuses études ont mis à contribution les apports des mesures altimétriques pour le suivi du niveau des cours d'eau sur le bassin amazonien : [Koblinsky et al., 1993] avec GeoSAT et [Birkett, 1998; De Oliveira Campos et al., 2001; Birkett et al., 2002] avec Topex/Poseidon ont ainsi exploré de manière approfondie la pertinence des mesures altimétriques sur quelques grands fleuves en prenant en compte, en plus de la précision des mesures altimétriques, (1) les résultats de l'échantillonnage temporel du signal

[9] Une largeur permettant l'acquisition de quelques mesures consécutives, sans élément perturbateur dans l'empreinte terrestre des échos radar, semble suffisante. Il est parfois fait référence dans la littérature à une largeur supérieure à 500m [Crétaux et Birkett, 2006], mais cette largeur nous apparait très notoirement insuffisante : [Birkett et al., 2002] préconise 1s, soit $5,8$km par exemple pour Topex/Poseidon. Le chapitre 8 de cette thèse aborde l'évaluation de l'impact de la largeur des cours d'eau du bassin amazonien sur la qualité moyenne des mesures altimétriques.

hydrologique et (2) la précision des mesures in-situ auxquelles on attribue la « vérité de terrain ». Ces travaux abordent également le problème des formes d'ondes de caractéristiques très variables selon les sites d'acquisition considérés (ou même les dates) et les difficultés inhérentes à leur traitement.

Les travaux de [Kosuth et al., 2006] ont permis, à partir des mesures de Topex/Poseidon, de combler un certain nombre de lacunes de nivellement topographique des stations limnimétriques du bassin amazonien (voir aussi la section 6.2.1.3, page 133). Ces valeurs de nivellement permettent de placer dans un même référentiel géoïdal les stations limnimétriques et d'utiliser de concert les mesures in-situ acquises en divers endroits du bassin, permettant par exemple de déterminer les pentes de l'Amazone et de ces principaux afluents. Ce travail fait l'objet d'un article à paraître [Kosuth et al., 2008], mettant à profit certains aspects de la méthode de quantification de la qualité des mesures altimétriques développée dans le cadre de cette thèse.

Dans le cadre du suivi de bassins versants peu équipés en appareillage de mesure (hauteurs, débit) et non nivelés, les travaux de [Leon et al., 2006b] appliqués au bassin du fleuve Caqueta (Colombie), font la démonstration de l'utilité des mesures altimétriques (Topex/Poseidon et ENVISAT). Dans cet exemple, les mesures altimétriques sont couplées à des modèles d'écoulement et des mesures in-situ afin d'estimer des variables hydrauliques telles que les débits, les pentes d'écoulement et les niveaux des eaux en période d'étiage. Des travaux similaires ont été menés sur le Rio Negro [Leon et al., 2006a; Seyler et Calmant, 2006].

D'autres études ont été consacrées à l'exploitation des mesures altimétriques sur les fleuves, avec comme objectif central :

- la calibration de modèles d'estimation des débits sur quelques grands fleuves (Negro, Solimoes et Amazone) [Coe et al., 2002] et leur utilisation pour l'estimation ultérieure des débits à partir des « nouvelles » mesures altimétriques [Zakharova et al., 2006],
- l'étude des échanges de sédiments entre l'Amazone et le les plaines d'inondation [Bourgoin et al., 2007], exploitant le nivellement altimétrique de stations limnimétriques du bassin amazonien à partir des données des satellites Topex/Poseidon, ENVISAT et ICESat [Bonnet et al., 2008],
- l'estimation du volume d'eau stocké dans les plaines d'inondation du bassin du fleuve Negro [Frappart et al., 2005],
- l'exploitation de multiples missions altimétriques (missions ERS-1/2 et ENVISAT) et de techniques de retracking pour le suivi du niveau de lacs et de fleuves [Berry et al., 2005].

De nombreux autres travaux ont abordé des sujets similaires dans le cas d'autres bassins fluviaux. C'est la cas par exemple de [Coe et Birkett, 2005] sur le bassin du lac Tchad, de [Kouraev et al., 2004] sur le fleuve Ob (Russie) ou encore de [Dominh et al., 2004] sur le bassin du Mékong.

Les bases de données existantes (ou « produits alti-hydrologiques »)

Ces dernières années, plusieurs groupes ont travaillé à l'élaboration de bases de données de produits issus de l'altimétrie radar (ou « produits alti-hydrologiques[10] ») dédiés au suivi de lacs et de cours d'eau.

Parmi les projets existants, nous pouvons citer les projets CASH (Contribution de l'Altimétrie Spatiale à l'Hydrologie, [Seyler et al., 2006]), « River & Lake » [Garlick et al., 2005] [RLH, 2006], HydroWeb [Morrow et al., 2006; Cauhopé et al., 2006] et « Global Reservoir and Lake Monitor » [Birkett et Mason, 1995] qui proposent des produits alti-hydrologiques issus des missions Topex/Poseidon, ERS-2 et ENVISAT principalement[11]. La plupart de ces bases de données sont accessibles gratuitement via internet,

[10] Nous nommons dans cette thèse « produit alti-hydrologique » un produit dérivé de données altimétriques et constitué de séries temporelles de mesures de niveau des eaux d'entités hydrologiques (cours d'eau, lacs, zones d'inondations). Voir les définitions détaillées au § 2.1.2 (page 49 et le chapitre 3 consacré à la génération des séries temporelles alti-hydrologiques).

[11] **Nota :** Nous pouvons également noter l'existence du projet « ALTICORE » dédié à la production de produits altimétriques optimisés pour les zones côtières [Lebedev et al., 2008].

par abonnement ou dans le cadre de collaborations. Elles illustrent la mobilisation des communautés scientifiques du domaine du spatial et du domaine de l'hydrologie pour valoriser au mieux le potentiel de l'altimétrie radar.

D'une manière générale, ces produits consistent en un ensemble de séries temporelles de niveaux (ou « séries temporelles alti-hydrologiques ») sur des sites hydrologiques prédéfinis (cours d'eau, lacs ou zones d'inondations) construites à partir de mesures altimétriques. Pour ce faire, diverses optimisations et/ou simplifications sont apportées aux séries temporelles de niveaux :

(1) les mesures altimétriques sont sélectionnées et/ou moyennées sur des fenêtres géographiques pour fournir une mesure « équivalente » par passage du satellite, sur la surface en eau,

(2) certains groupes se sont intéressés au retraitement (retracking) des formes d'onde radar, disponibles dans des produits altimétriques « officiels » de bas niveau, et ont mis en œuvre des algorithmiques (nouvelles ou existantes) dans le but d'améliorer la précision des séries temporelles de niveau et/ou leur période d'échantillonnage effective. Cela est par exemple le cas des projets CASH (formes d'ondes de Topex/Poseidon retraitées avec la chaîne de traitement de l'altimètre d'ENVISAT) [Mercier et Zanife, 2006] et River & Lake (formes d'ondes de ERS-1/2 et ENVISAT retraitées à l'aide d'un système expert) [Berry et al., 2005].

1.2 Difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales

Les difficultés inhérentes à la mesure altimétrique radar sur les eaux continentales sont nombreuses. Ceci est fortement lié à la nature des instruments altimètres, développés spécifiquement pour le suivi des océans.

1.2.1 Physique de la mesure et difficultés sur les eaux continentales

Suivi de la surface (tracking)

Un système de « tracking » permet à l'altimètre d'estimer, à partir des valeurs de range précedemment mesurées, dans quelle gamme de distances (ou de manière équivalente d'instants) devrait se trouver la mesure de range à venir. Plus précisément, ce système permet de positionner une fenêtre d'observation temporelle sur la forme d'onde attendue. La forme d'onde ainsi mesurée est échantillonnée dans le temps à une cadence très élevée (période d'échantillonnage de l'ordre de la nanoseconde) sur un certain nombre d'échantillons (ou « portes »).

Dans le cas de variations inattendues du relief observé, ce système peut se retrouver temporairement incapable d'estimer la gamme de distances dans laquelle devraient se trouver les mesures de range à venir. Ce phénomène est appelé le « décrochage ».

Selon les missions altimétriques, ce système est plus ou moins sophystiqué. Par exemple, pour la mission Topex/Poseidon, il consiste à positionner le front de montée des formes d'ondes sur la 32ème porte (ou échantillon) de la fenêtre d'observation. En cas de décrochage, le système est réinitialisé et la précédure peut prendre entre 1 et 3 secondes [Chelton et al., 2001] : ceci revient à perdre entre 10 et 30 mesures à 10Hz sur une distance de 5 à 15km environ.

Le système de traking de la mission ENVISAT est adaptatif et permet, en cas de décrochage, de dégrader temporairement et de manière adaptative le pas temporel d'échantillonnage de la forme d'onde mesurée (ce qui revient à un élargissement la fenêtre temporelle). Ainsi le système est capable de retrouver plus facilement la trace de la surface à mesurer et donc de converger plus rapidement vers l'état d'accroche. Les coefficients d'élargissement de la fenêtre d'observation est de 4 pour les missions ERS-1/2, et de 4 ou 16 pour ENVISAT.

Surface en eau vs surfaces émergées

Les conditions de mesure sur les surfaces continentales sont très différentes des conditions de mesures océaniques. La taux de surface en eau dans la cible observée par l'altimètre joue un rôle important et va conditionner la qualité des mesures.

Il a été montré que la tecnhique de mesure altimétrique sur les lacs donne de très bon résultats [Crétaux et Birkett, 2006] ; les conditions y sont proches de celles de l'océan : surface en eau uniquement et pour sur une distance (longueur longitudinale à la trace) suffisante pour s'affranchir des effets néfastes du relief sur le système de tracking. Sur les fleuves, ces conditions se dégradent car les surfaces en eaux ne comblent généralement pas l'intégralité de la surface éclairée par l'onde radar.

La figure 1.17 illustre ces propos en représentant sur une station virtuelle (TP-178A-Madeira, à l'intersection entre la trace 178 de Topex/Poseidon et le fleuve Madeira), les contours des surfaces illuminées par l'onde radar. On peut y apprécier le taux de surface en eau dans l'empreinte des échos radars successifs.

Analyse des formes d'onde radar (retracking)

La présence de terres émergées dans les surfaces éclairées par les pulses radars vont perturber le signal retour enregistré par l'altimètre. Ces éléments de surface présentent des caractéristiques morphologiques et de rétrodiffusion bien différentes de celles des surfaces océaniques. Il en résulte des formes d'onde de morphologies très variables et difficilement interprétables car la complexité des configurations rencontrées fait qu'aucun modèle de retracking n'est *a priori* adapté à ce type de surfaces.

La figure 1.18, qui reprend la figure 1.4 (cf. pagre 23), donne une illustration de la formation d'une forme d'onde pour les surfaces continentales.

Divers travaux récents ou à venir envisagent la classification préalable des formes d'ondes mesurées sur les continents de manière à les analyser à l'aide du modèle de forme d'onde le plus adapté possible. Pour exemple, l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University met en œuvre un système expert (de classification) permettant de déterminer parmis 11 modèles, le modèle le plus adapté à une forme d'onde donnée [Berry et al., 1997].

1.2.2 Corrections des mesures altimétriques

Diverses sources d'erreur entrent en jeux lors de l'évaluation du range. Pour corriger ces erreurs, un ensemble de corrections sont proposées dans les produits altimétriques.

Corrections instrumentales

Les corrections instrumentales sont principalement destinées à corriger des imperfections intrinsèques aux instruments. Dans la plupart des produits altimétriques, ces corrections sont déjà appliquées aux valeurs de range mais elles sont cependant fournies.

Corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques sont un ensemble de corrections permettant de corriger les effets de ralentissement des ondes radar dans les différentes couches de l'atmosphère.

Correction liée à la ionosphère : Le ralentissement des ondes radar dans la ionosphère est provoquée par la présence d'électrons libres dans l'atmosphère libérés par ionisation d'atomes sous l'effet du rayonnement solaire, il dépend également de la fréquence de l'onde radar utilisée.

L'erreur introduite sur la mesure du range est de 20cm au maximum, elle peut être mesurée par un altimètre bi-fréquence (c'est le cas de TOPEX) ou à l'aide du système DORIS.

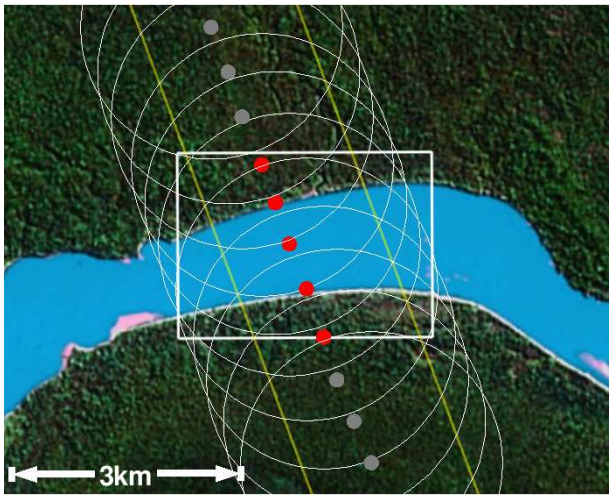


FIG. 1.17: Illustration, à la station virtuelle « TP-178A-Madeira » (à l'intersection entre la trace 178 de Topex/Poseidon et le fleuve Madeira), des surfaces éclairées par les pulses radar successifs (cercles blancs), ainsi que leurs centres respectifs (points gris hors de la station virtuelle, et point rouges sur la station virtuelle). Les traits jaunes déterminent les limites Est et Ouest de la trace de Topex/Poseidon.

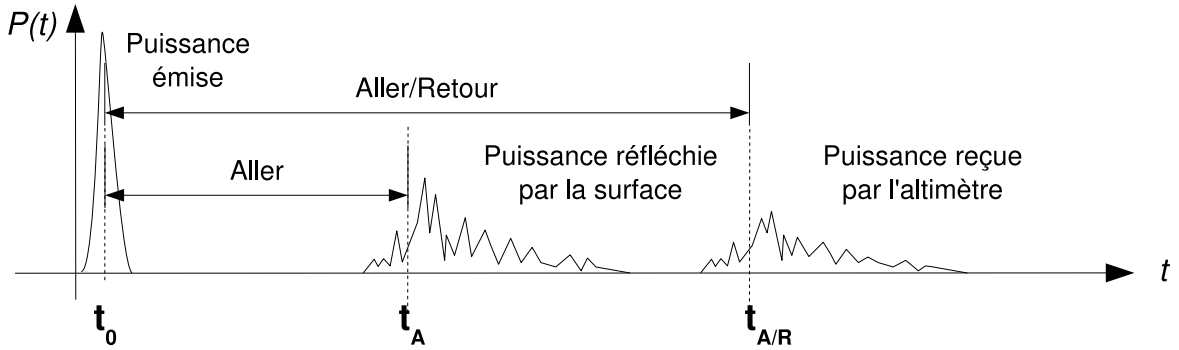


FIG. 1.18: Illustration de la formation au cours du temps de l'onde radar réfléchie par une surface continentale. La présence de surfaces émergées dans l'empreinte radar va perturber la forme de l'onde réfléchie, puis enregistrée par l'altimètre. Ces éléments de surfaces émergées, généralement plus haut que le plan d'eau que l'on cherche à observer, vont marquer l'onde retour par la présence de nombreux pics parasites. Ils reflètent les différentes gammes de hauteurs et de rétrodiffusions présentes dans la scène : végétation haute, basse, banc de sable, cultures, constructions, etc.

Corrections liées à la troposphère sèche : La présence de gaz tels que le diazote ou le dioxygène dans les basses couches de l'atmosphère a pour effet la modification de l'indice de réfraction atmosphérique. Cette correction ne peut pas être mesurée par les instruments embarqués par les satellites, elle est estimée à partir des modèles météo tels que le modèle de l'ECMWF (European Center for Meduim-range Weather Forecast) employé pour les missions Topex/Poseidon, ERS-1/2 et ENVISAT.

Cette correction présente une composante systématique de $2{,}3$m à laquelle s'ajoute une composante variable d'une amplitude relativement faible de 2 à 5cm.

Corrections liées à la troposphère humide : Dans le cas des satellites d'océanographie, un radiomètre embarqué permet de mesurer en permanence la teneur en vapeur d'eau et en eau liquide de l'atmosphère afin d'en déduire la correction liée à la troposphère humide. Cependant, ces radiomètres sont généralement mis en échec sur les continents [Mercier et Zanife, 2006] et les corrections ne peuvent pas être calculées. De manière générale, il en résulte dans les produits altimétriques un très faible taux de disponibilité de cette correction pour les mesures altimétriques sur les eaux continentales. Pour remédier à ce problème, des travaux ont été menés pour estimer cette correction à partir de modèles météo [Mercier et Zanife, 2006].

Cette correction est composée d'une composante systématique d'environ $0{,}5$m et d'une composante variable de $0{,}2$m d'amplitude.

Pour plus de détails sur ces corrections, voir la thèse de Franck Mercier ([Mercier, 2001], p. 51-55) et [Chelton et al., 2001].

1.3 Caractérisation de la qualité des mesures altimétriques sur les eaux continentales

La section § 1.1.5 a introduit de manière synthétique les grands champs d'application de l'altimétrie radar en hydrologie continentale, et a dressé une liste (non-exhaustive) des bases de données existantes qui délivrent des produits optimisés, les produits alti-hydrologiques, pour les applications hydrologiques.

Ces efforts constituent une première étape vers la généralisation de l'utilisation des produits alti-hydrologiques dans les études en hydrologie. Cependant, ces produits alti-hydrologiques souffrent des lacunes suivantes :

(1) Les produits alti-hydrologiques ne sont pas accompagnés d'une information sur l'incertitude des mesures altimétriques qu'ils contiennent[12].

(2) Les produits alti-hydrologiques ne sont pas accompagnés d'une information sur la période d'échantillonnage effective des mesures altimétriques qu'ils contiennent.

(3) Les méthodes de génération de ces produits alti-hydrologiques ne sont pas ou peu décrites dans les publications et on ne connait que très imparfaitement leur mode de génération (par exemple filtrage automatisée, semi-automatisée ou manuel).

Deux remarques peuvent être ajoutées :

1. les mesures altimétriques du projet CASH sont fournies avec un champ « qualité » mais la nature de cette information n'est pas précisée,
2. le site internet[13] du projet « Global Reservoir and Lake Monitor » annonce des précisions centimétriques ($5 \sim 10$cm) sur les grands lacs du nord américain (cf. figure 1.19), ces valeurs semblent issues de travaux de Charon Birkett [Birkett et Mason, 1995; Birkett, 1998].

[12] Certains produits alti-hydrologiques (HydroWeb et CASH) intègrent des valeurs de dispersion des mesures altimétriques, collectées lors de chaque passage du satellite au dessus du plan d'eau. Ces valeurs de dispersion n'informent pas sur l'incertitude des mesures altimétriques.

[13] Visiter : *http://bigquill.gsfc.nasa.gov/validation.html*

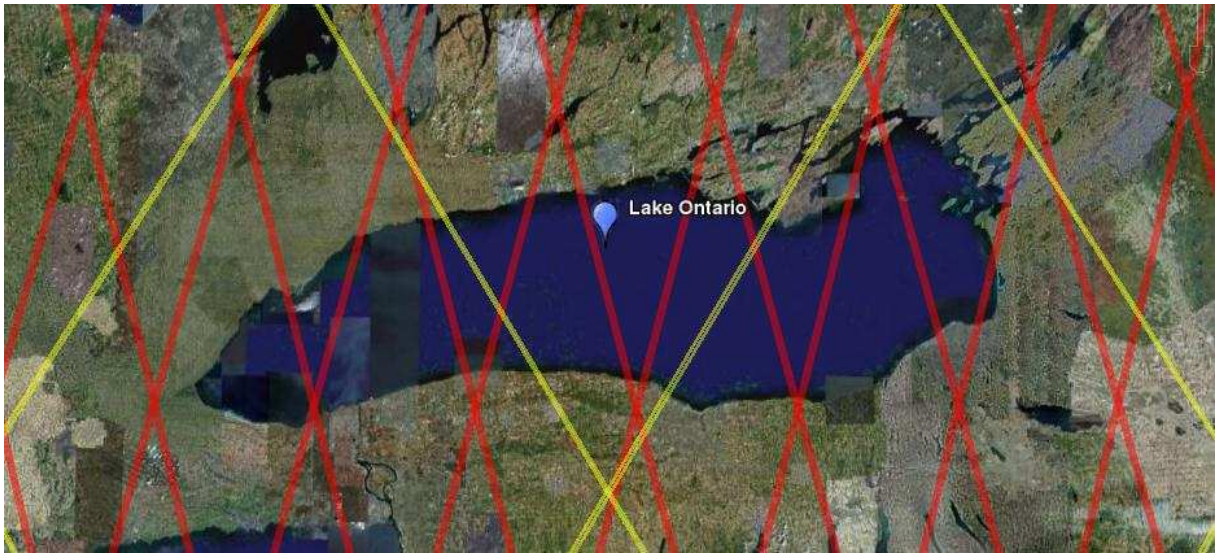


FIG. 1.19: Photo satellite du lac Ontario et des traces des satellites Topex/Poseidon (traits jaunes) et ENVISAT (traits rouges). (Image GoogleEarth)

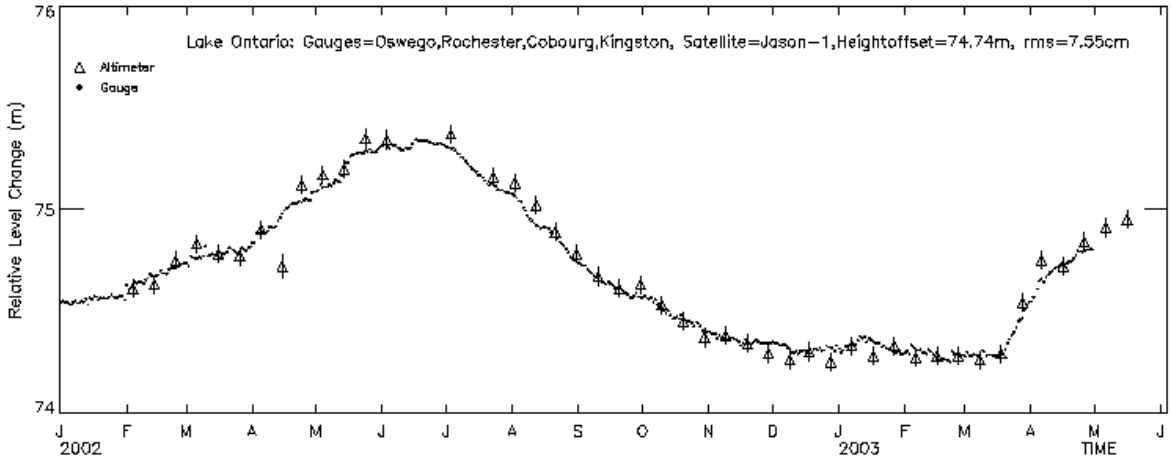


FIG. 1.20: Série temporelle alti-hydrologique du satellite Topex/Poseidon sur la lac Ontario fournie par le projet « Global Reservoir and Lake Monitor ». La précision RMS des mesures altimétriques du niveau des eaux est de $7,5$cm sur ce lac d'une surface de $\sim 100\text{km}^2$ [Birkett et Mason, 1995] [Birkett, 1998].

L'absence d'indicateurs sur l'incertitude des mesures et sur la période d'échantillonnage effective des séries temporelles alti-hydrologiques fournies dans ces produits constitue un frein à leur utilisation : il n'est pas envisageable pour nombre d'hydrologues d'utiliser des mesures dont on ne connait pas les caractéristiques.

La connaissance de la qualité des produits alti-hydrologiques est une condition indispensable pour l'exploitation effective de l'altimétrie satellitaire radar dans le cadre de l'étude des eaux de surface en général et d'applications hydrologiques en particulier.

La présente section présente un paysage des travaux menés sur la précision[14] des mesures de niveaux des eaux issues de l'altimétrie satellitaire radar. Nous donnerons tout d'abord un aperçu des différentes techniques de quantification de la précision absolue des mesures altimétriques sur les eaux continentales (§ 1.3.1) puis dans un second temps, nous aborderons les aspects liés à la technique des algorithmes de retracking (§ 1.3.2).

1.3.1 Méthodes d'évaluation de la précision des mesures altimétriques

Budget d'erreur des mesures altimétriques

Les altimètres qui équipent les satellites font l'objet avant leur mise en service (1) d'une estimation du bilan d'erreur des mesures et (2) de divers tests de bon fonctionnement et d'estimation du bilan d'erreur réelle. On trouve par exemple dans la littérature [Fu et al., 1994], l'estimation du budget théorique de l'erreur de mesure sur des surfaces de type océanique pour les altimètres NASA/TOPEX (parfois appelé « ALT » ou NRA pour « NASA Radar Altimeter ») et CNES/Poseidon, qui équipent le satellite Topex/Poseidon.

Ce budget d'erreur théorique est de $13,7$cm et comprend une part de $12,8$cm imputable à la détermination de la composante verticale de l'orbite. Cependant, les analyses menées sur les données de la première année de fonctionnement de Topex/Poseidon font état de précisions réelles bien meilleures du fait d'importantes améliorations apportées dans la détermination de la composante verticale de l'orbite. Les budgets d'erreur réels sont alors ramenés respectivement à $4,7$cm pour TOPEX et à $5,2$cm pour Poseidon sur les océans [Tapley et al., 1994; Nerem et al., 1994; Fu et al., 1994].

Ces valeurs publiées en 1994, sont à considérer comme des valeurs hautes et peuvent être aujourd'hui revues à la baisse. En effet, de nombreuses améliorations ont été apportées par les équipes de recherche, notamment dans les processus de détermination des orbites et dans les modèles d'estimation des corrections atmosphériques (notamment des corrections de troposphère sèche et humide) employées pour corriger les effets de ralentissement des ondes radar dans les différentes couches de l'atomsphère.

Grands lacs et mers intérieures

L'étude de la précision sur les grands lacs a permis de quantifier de manière très précise la précision absolue des mesures altimétriques, les grands lacs présentant des caractéristiques similaires aux océans, ne subissant pas les effets de marées et disposant, pour certains, de réseaux hydrométriques et géodésiques de haute précision.

Dans leurs travaux, Morris et Gill [Morris et Gill, 1994a] ont quantifié la précision des mesures altimétriques effectuées à l'aide de Topex/Poseidon par comparaison avec les mesures in-situ des grands lacs du nord américain. Les travaux portent indépendemment sur l'altimètre de la NASA (ALT/NRA) et sur celui du CNES (SSALT/Poseidon). L'analyse de la précision des mesures altimétriques donne une précision RMS inférieure à $4,5$cm pour 15 des 17 des sites étudiés et s'étendent de manière globale jusqu'à $9,59$cm, pour une précision moyenne tous sites confondus de $4,12$cm.

[14] Cf. § 2.1.3, page 51, pour plus de détails sur la notion de précision.

Les très bonnes précisions obtenues sur ces lacs ont également permis à Morris et Gill de mettre en évidence un biais systématique entre les orbites calculées respectivement par le CNES et la NASA et montrent que l'orbite CNES est légèrement plus précise que celle de la NASA.

Des travaux similaires [Morris et Gill, 1994a] ont été menés à partir des mesures altimétriques du satellite GeoSAT, et affichent une précision RMS moyenne de $11,1$cm.

D'autres travaux ont permis, à partir d'analyse de la précision des mesures altimétriques sur les grands lacs américains, de mettre en évidence des erreurs dans les modèles de géoïde. Ainsi, Jekeli et Dumrongchai [Jekeli et Dumrongchai, 2003] ont décelé une erreur locale de 33cm dans le modèle G99SS et montrent que la qualité de celui-ci n'est pas suffisante pour une analyse fine de la précison des mesures altimétriques sur ces lacs.

Confrontation mesures in-situ / altimétrie sur le bassin amazonien

En 1993, Koblinsky et al. publient les résultats de travaux très complets sur la mesure du niveau de l'Amazone effectuée par le satellite GeoSAT [Koblinsky et al., 1993]. Dans leur article, Koblinsky et al. abordent diverses facettes liées à la précision des mesures altimétriques sur les cours d'eau et à leur qualité en général : les dimensions des cibles hydrologiques à observer, la précision et la période d'échantillonnage effective des mesures altimétriques, la spécificité des formes d'onde sur les surfaces continentales (retracking) et même la précision des mesures in-situ qui doivent servir de référence pour l'analyse de la précision (voir aussi la section 6.2.2).

Ainsi, ces travaux examinent de près le potentiel d'utilisation des missions d'almétrie radar pour un suivi opérationnel des larges fleuves. Une des conclusions importantes de cet article est que le principal poste d'erreur des mesures altimétriques provient des erreurs de retracking et des corrections du range (bien que l'incertitude sur la composante verticale de l'orbite de GeoSAT soit de $0,5$m environ).

Il est intéressant de noter que Koblinsky et al. ont mené une analyse de la précision à partir d'une technique de filtrage manuelle et d'une autre automatique. Les comparaisons entre les séries temporelles altimétriques résultantes et les séries temporelles in-situ, sur 4 sites de l'Amazone, présentent des précision RMS de $0,7$m pour le filtrage manuel et $1,2$m pour le filtrage automatique.

Charon Birkett [Birkett, 1998] a comparé les mesures altimétriques de Topex/Poseidon aux mesures in-situ relevées sur de larges fleuves (i.e. de largeur > 1km) et des zones humides du bassin amazonien. La méthode employée met en œuvre des techniques de filtrage automatique, assistées d'une édition manuelle des mesures lorsque celle-ci « sont grossièrement en dehors de la série temporelle ».

Les résultats obtenus montrent, dans le meilleur des cas (Pantanal), une précision RMS oscillant entre 11cm et 14cm selon la saison. D'autres résultats montrent des précision RMS moyenne de 25cm sur des zones d'inondation proches de l'Amazone et 60cm sur le fleuve lui-même. Un détail intéressant abordé par Birkett est le temps de 1s environ nécessaire au « réaccrochage » de Topex/Poseidon (NRA) lorsque celui-ci à perdu sa cible de vue ou « décroché » (i.e. n'arrive plus à suivre les variations du relief).

En 2002, Charon Birkett propose une analyse plus poussée de la précision des mesures altimétriques [Birkett et al., 2002][15]. L'étude porte sur une quarantaine de site (zones d'inondations, fleuves, ou mélanges des deux) parmi lesquels 14 se situent exclusivement sur des cours d'eau.

La méthode de comparaison des mesures altimétriques et mesures in-situ est décrite de manière relativement complète. En raison de l'importante distance entre station limnimétrique in-situ et et trace du satellite sur le fleuve (station virtuelle), il est procédé à deux réajustements des données : (1) un ajustement vertical des mesures altimétriques, en périodes de hautes eaux, sur les mesures in-situ ; (2) un ajustement temporel des mesures in-situ (pour quelques cas) lorsqu'un déphasage entre les séries temporelles altimétrique et in-situ est constaté, ce décalage est appliqué de manière à minimiser l'erreur RMS. L'erreur RMS moyenne résultante sur les 14 sites est de $1,01$m.

[15] Les travaux de [Birkett et al., 2002] font l'objet d'une analyse particulière au chapitre 7 de la thèse.

Les travaux de l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University [Berry et al., 2005] ont comparé les mesures de Topex/Poseidon, ERS-2 et ENVISAT aux mesures in-situ de la station limnimétrique de Careiro (code ANA 15040000) située sur l'Amazone, tout près de Manaus. Les résultats sont présentés sous la forme de coefficients de corrélation de De Pearson (r^2, cf. § 2.1.3 page 52) entre les mesures d'un satellite et les mesures in-situ ($0,91$ pour Topex/Poseidon, $0,93$ pour ERS-2 et $0,98$ ENVISAT). Cependant, l'analyse de la corrélation entre deux séries temporelles n'indique pas l'ordre de grandeur de la précision des mesures car le coefficient de De Pearson est insensible à l'amplitude de variation des variables qu'il lie.

Il convient d'ajouter que l'on trouve dans certaines publications et présentations des valeurs de précision optimistes qui ne se réfèrent souvent qu'à un petit nombre de stations favorables, et n'indiquent pas la nature du filtrage, parfois manuel (ou assisté par la connaissance de l'erreur), des mesures altimétriques. Ainsi une valeur de précision de $0,25$m, ou plus généralement de quelques dizaines de centimètres, est parfois évoquée :

[Koblinsky et al., 1993] : *« The overall level of comparison is* 0.7 *m rms when the technique is applied manually, and* 1.2 *m rms when an automated version of the method is applied. At one location the average difference is* 0.2 *m rms. »* ,

[Birkett et al., 2002] : *« First-order validation exercises with the deduced 1992-1999 time series of stage fluctuations reveal accuracies ranging from tens of centimeters to several meters (mean* $\sim$ 1.1 *m rms). »* ,

[Calmant et Seyler, 2006] : *« [...] the overall uncertainty of altimetric measurements over continental waters is now in the order of a couple of decimetres. »* ,

[Frappart et al., 2006] : *« Radar altimetry from T/P has demonstrated the capability to monitor water level variations of lakes, rivers, wetlands, and floodplains with a precicion of several tens of centimeters. »* ,

Nous verrons qu'elle est exceptionnelle et ne correspond pas à une réalité statistiquement fiable.

1.3.2 Techniques de « retracking »

Comme nous venons de le voir dans la section précédente, et selon [Koblinsky et al., 1993], une des principales sources d'erreur des mesures altimétriques sur les cours d'eau provient des erreur d'estimation du range par les algorithmes embarqués (trackers) ou appliqués *a posteriori* sur les formes d'onde radar (retrackers).

Ces erreurs d'estimation du range sont globalement imputables à la complexité et à la diversité des surfaces continentales rencontrées par les altimètres et à l'incapacité des algorithmes actuels, optimisés pour le suivi des surfaces océaniques, de traiter cette variété de formes d'ondes correctement [Smith, 1997].

Le problème du (re)tracking a mobilisé de nombreuses équipes de recherche, et de nombreux travaux ont été publiés. Deux ensembles de recherches se dégagent nettement : (1) les travaux portant sur la comparaison de retrackers existants, mettant en lumière les performances, qualités et défauts des algorithmiques et (2) les travaux portant sur le développement de nouvelles algorithmiques et leur évaluation. Cette section propose de parcourir brièvement les travaux réalisés dans le cadre de ces deux approches.

Comparaison de (re)trackers

Durant ses travaux de thèse, Fédéric Frappart a mené une étude comparative des quatre retrackers du segment sol de la mission ENVISAT [Frappart et al., 2006]. L'analyse porte sur onze sites de mesure sur des fleuves et sur trois lacs du bassin amazonien. L'étude comparative des performances de ces quatre algorithmes de retracking met en évidence que l'algorithme Ice1 présente les plus faibles erreurs (de $0,1$m en hautes eaux à $0,2$m en basses eaux, selon l'estimateur MAD[16]).

[16]MAD pour « Median Absolute Deviation » : $MAD(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} |x_i - x_{\text{med}}|$, avec x_{med} la médiane des N valeurs x_i.

Cet article propose également une méthode, dite de « migration » des mesures, permettant la correction des effets « d'accroche » de l'altimètre sur une cible (i.e. lorsque celui-ci garde comme cible une surface venant d'être survolée par le satellite et qui n'est plus au nadir).

Les travaux de [Mercier et Zanife, 2006] ont permis de retraiter les formes d'onde de Topex/Poseidon à l'aide des algorithmes de retracking du segment sol de la mission ENVISAT[17] et de combler les lacunes importantes des corrections de troposhère sèche et humide dans les produits standard de la mission (produits altimétriques PODDAC ou AVISO). Ce travail original s'inscrit dans le cadre du projet CASH (cf. § 2.3.2), et le produit altimétrique qui en est issu est à l'origine du produit alti-hydrologique construit dans le cadre de ce projet. La mise en œuvre de ces retrackers sur les formes d'onde de Topex/Poseidon a permis un gain très important au niveau du nombre de mesures altimétriques interprétées (non rejetées) par l'algorithme (trois fois plus que dans le produit standard AVISO/M-GDR), tout en préservant une précision correcte (voir les résultats de cette analyse aux sections 7.4.6 à 7.4.9). Notons que ce travail n'aborde pas l'analyse de la précision de ces nouvelles mesures altimétriques exploitant ces nouvelles corrections.

Développement de retrackers

Pour faire face à la diversité des formes d'ondes rencontrées sur les terres émergées, l'équipe E.A.P.R.S. de De Montfort University a mis au point, pour le projet « River & Lake » de l'ESA, un système expert basé sur 11 retrackers spécialisés. Chaque algorithme est alors responsable de l'interprétation d'une famille prédéterminée de formes d'ondes [Garlick et al., 2005; Berry, 2006; Berry et al., 2006; Harrison et al., 2006], après qu'un premier module expert ait classifié ces formes d'onde pour les associer à une des familles.

Un partenariat entre le Cemagref, l'ESA et De Montfort University nous a permis de quantifier la qualité des produits alti-hydrologiques issus de ces développements.

L'analyse de la qualité de ces produits alti-hydrologiques montre des performances très prometteuses (voir les résultats au chapitre 7, sections 7.4.2 et 7.4.3).

Vivien Enjolras a mis au point une approche basée sur la modélisation, trace par trace, des formes d'ondes radar à partir de données physiques (SRTM, LANDSAT) [Enjolras et Rodriguez, 2006]. Cette approche s'éloigne donc des modèles paramétriques globaux classiques qui sont habituellement utilisés [Brown, 1977].

Enfin, d'autres recherches ont amené à développer de nouvelles algorithmiques, citons notamment les travaux de [Rodriguez et Martin, 1994; Quartly, 2000] (Topex/Poseidon) et [Deng et Featherstone, 2006] (ERS-2).

Conclusion

Comme on peut le constater au vu de cette synthèse des travaux menés sur les eaux continentales, ce sujet a été abordé au cas par cas, sans une approche méthodologique robuste et statistiquement significative. Les travaux de [Birkett et al., 2002] sont les plus avancés en ce sens bien qu'ils n'aient été mis en œuvre que pour un nombre limité de stations et pour un seul produit alti-hydrologique.

La communauté scientifique semble aujourd'hui véhiculer deux messages :

(1) la précision des mesures altimétriques sur les cours d'eau est de quelques décimètres,

(2) cette précision est liée à la largeur des cours d'eau,

dont nous verrons dans cette thèse qu'ils sont en grande partie erronés.

[17] Les données produites dans le cadre de ces travaux font l'objet d'un nombre important d'analyses dans cette thèse. Le produit altimétrique correspondant, appelé CLS/TP/« ENVISAT-L2 », fait l'objet d'une caractérisation approfondie au chapitre 7.

1.4 Objet et objectifs de la thèse

1.4.1 Contexte général de la thèse

Les développements technologiques rapides de l'Altimétrie Satellitaire Radar et les enjeux de son application au suivi des eaux continentales obligent à renforcer la rigueur des méthodes de caractérisation de la qualité des mesures satellitaires sur les eaux continentales. Ceci est indispensable pour trois raisons majeures :

(1) Fournir aux utilisateurs de ces données (hydrologues, gestionnaires des ressources en eau) une information sur l'incertitude des mesures altimétriques. Ces mesures pourront alors être intégrées dans les modèles et systèmes d'information des utilisateurs, et mobilisés en pleine connaisssance de leurs limites.

(2) Pouvoir objectivement analyser la précision de la mesure en fonction des caractéristiques physiques du système observé (morphologie des cours d'eau, relief environnant, végétation).

(3) Pouvoir quantifier l'amélioration de précision apportée par les développements algorithmiques et technologiques, et définir une stratégie de recherche et développement cohérente.

Comme la synthèse de l'état de l'art présentée en section 1.3 l'a montré, il n'existe pas actuellement de **méthode de référence pour la caractérisation de la qualité des mesures d'altimétrie satellitaire radar sur les eaux continentales**. Cette absence a pénalisé les travaux de recherche des dix dernières années et rend difficile la définition d'une stratégie de recherche cohérente pour les dix prochaines années. Le sujet de thèse a pour ambition de contribuer à combler cette lacune.

1.4.2 Précision, incertitude, échantillonnage et applications des mesures altimétriques

De nombreuses publications font état du fort potentiel des techniques d'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales en général. Elles l'illustrent généralement sur quelques cas particuliers (lacs, stations sur des cours d'eau, etc.) et abordent le problème de la qualité des mesures altimétriques sous des facettes particulières.

Nous proposons de traiter le problème de la qualité des mesures altimétriques de façon large, c'est à dire sous deux angles complémentaires : celui de la **Qualité altimétrique** caractérisée par la précision et le taux de perte de mesures ; celui de la **Qualité hydrologique** caractérisée par l'incertitude sur les mesures, la période d'échantillonnage effective et la qualité de reconstitution du signal limnimétrique.

Qualité altimétrique :

Précision : La précision des mesures altimétriques est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ, réalisée par rapport valeurs in-situ. Ainsi, pour une valeur in-situ donnée, elle signifie que la mesure altimétrique est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{is} \pm \text{précision}]$. La précision est associée à la valeur in-situ.

Taux de perte de mesures : Les mesures altimétriques présentent une période d'échantillonnage théorique liée à la période de retour du satellite sur la même trace. Dans la pratique, le produit alti-hydrologique sur un plan d'eau particulier ne fournit pas toujours des mesures à chaque passage. Le taux de pertes exprime sous forme de pourcentage le rapport entre le nombre de passages sans mesure et le nombre total de passages.

Qualité hydrologique :

Incertitude : L'incertitude des mesures altimétriques est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ, réalisée par rapport aux mesures altimétriques. Ainsi, pour une mesure altimétrique donnée, elle signifie que la valeur in-situ est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{Sat} \pm \text{incertitude}]$. L'incertitude est associée à la mesure alti-hydrologique.

Période d'échantillonnage effective : La période d'échantillonnage effective résulte du taux de perte de mesures, elle est égale à la période d'échantillonnage théorique divisée par (1 - taux de perte de mesures). Par exemple, une période d'échantillonnage théorique de 10 jours (Topex/Poseidon) et un taux de perte de mesures de 50% se traduit par une période d'échantillonnage effective de 20 jours.

Qualité de reconstitution du signal limnimétrique : l'enjeu des mesures de niveau pour les hydrologues est de pouvoir reconstituter le signal liminimétrique (variations du niveau au cours du temps) en un point donné d'un fleuve. L'altimétrie radar offre une possibilité d'échantillonnage à une période d'échantillonnage effective donnée et avec une incertitude donnée. Le signal limnimétrique continu que l'hydrologue pourra reconstituer à partir de cet échantillonnage et d'une méthode de suréchantillonnage donnée (interpolation temporelle) sera donc biaisé par rapport au signal naturel. Cette erreur entre signal limnimétrique naturel et signal limnimétrique reconstitué à partir de l'altimétrie radar conditionne la qualité de reconstitution du signal limnimétrique. Cette qualité est liée d'une part au signal naturel (à ses caractéristiques spectrales) et d'autre part à la qualité altimétrique du produit et à la méthode de suréchantillonnage.

La Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques devra permettre pour un produit alti-hydrologique donné de rendre compte de l'ensemble de ces critères de qualité. De plus, cette quantification des critères devra se faire sur un grand nombre de sites sur les cours d'eau (stations virtuelles) pour obtenir une caractérisation statistiquement représentative de la qualité.

1.4.3 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de définir une méthode de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques sous l'angle altimétrique (précision et taux de perte de mesures) comme sous l'angle hydrologique (incertitude, période d'échantillonnage effective et qualité de reconstitution du signal limnimétrique).

Nous appliquerons cette méthode à différents produits alti-hydrologiques de façon à fournir une caractérisation « objective » (statistiquement représentative) de l'état actuel de la précision de l'altimétrie radar sur les cours d'eau.

Nous l'utiliserons également pour comparer les performances de différentes chaînes de filtrage automatique, de fenêtrage géographique et de (re)tracking des formes d'onde.

Nous l'appliquerons enfin au calcul de l'incertitude associée à chaque mesure alti-hydrologique, de façon à fournir aux hydrologues des produits mobilisables en connaissance de causes.

1.4.4 Contexte de déroulement de la thèse

Cette thèse AgroParisTech-ENGREF s'est déroulée dans le cadre de l'école doctorale SIBAGHE (initialement Terre Eau Espace).

Elle a été cofinancée par le CNES et Thales Alenia Space (Alcatel Alenia Space en 2004) pour les trois premières années (11/2004 à 11/2007) et par le Cemagref la quatrième année (11/2007 à 11/2008).

La thèse s'est déroulée avec les moyens techniques et administratifs de la Maison de la Télédétection (UMR TETIS, Montpellier) et du Cemagref (groupement de Montpellier) et l'appui de différents organismes (IRD, ANA, CLS, IFR ILEE).

Chapitre 2

DÉFINITIONS ET DONNÉES UTILISÉES

Sommaire

2.1 Définitions et notations usuelles 48
2.1.1 Définitions liées aux données in-situ 48
2.1.2 Définitions liées à l'altimétrie radar 49
2.1.3 Définitions et notations des indicateurs de qualité 51
2.1.4 Deux approches de la qualité 53
2.1.5 Récapitulatif des notations 53
2.2 Sources de données terrestres 55
2.2.1 Données géographiques 55
2.2.2 Données géodésiques 57
2.2.3 Données hydrologiques 59
2.3 Sources de données altimétriques 62
2.3.1 Généralités concernant sur les produits altimétriques 62
2.3.2 Les produits altimétriques utilisés dans cette thèse 65
2.3.3 Dénomination des produits alti-hydrologiques, stations virtuelles et séries temporelles altimétriques 68

2.1 Définitions et notations usuelles pour l'altimétrie radar appliquée au suivi des eaux continentales

La présente section introduit les définitions terminologiques utilisées dans ce mémoire, ainsi que certaines notations mathématiques nécessaires à l'explication des méthodes développées dans le cadre de cette thèse.

2.1.1 Définitions liées aux données in-situ

Définitions générales

- **Station limnimétrique :** station de mesure du niveau d'un cours d'eau. Généralement, les mesures sont échantillonnées à un pas de temps fixé. Les mesures sont relevées par un système automatisé ou par un opérateur.

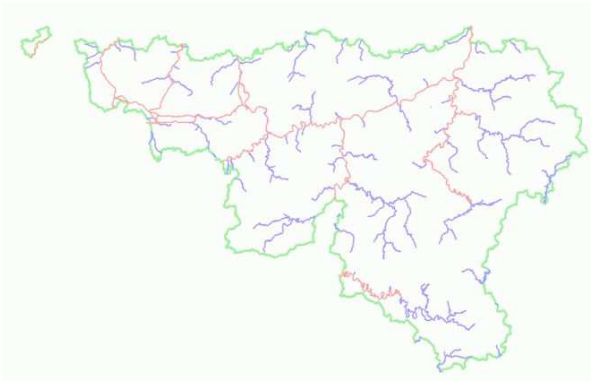
- **Station hydrométrique :** station de mesure du débit et/ou du niveau d'un cours d'eau.

- **Bassin versant (ou bassin hydrographique) :** portion de territoire délimitée par des lignes de crête, dont les eaux s'écoulent par un exutoire commun.

- **Réseau hydrométrique :** ensemble de stations limnimétriques et/ou de stations hydrométriques disposées le long des cours d'eau porur une région donnée.

- **Réseau hydrographique :** Représentation graphique des cours d'eau constituant un réseau d'écoulement des eaux d'une région donnée, généralement à l'échelle d'un pays ou d'un bassin versant.

(a) Illustration du réseau hydrométrique de la région Midi-Pyrénées, chaque point correspond à une station hydrométrique



(b) Réseau hydrographique de la Wallonie

FIG. 2.1: Illustration d'un réseau hydrométrique (a) et d'un réseau hydrographique (b).

Définitions des données

La liste des définitions liées mesures in-situ du niveau des cours d'eau est présentée par ordre croissant de granularité des données, de la mesure individuelle à la base de données hydrologique :

- **Mesure in-situ :** mesure de terrain représentant le niveau d'un cours d'eau en un point donné, et pour un instant donné.
  Une mesure in-situ trouve son origine au zéro de l'échelle limnimétrique qui a servi à sa mesure. Notons que les échelles limnimétriques ne sont pas nécessairement nivelées par rapport au niveau moyen des océans.

– **Série temporelle mesurée in-situ :** ensemble de mesures acquises par une station de mesure limnimétrique in-situ. La période d'échantillonnage temporelle des séries temporelles mesurées in-situ pour les grands cours d'eau est de l'ordre du jour ou de quelques heures.

– **Base de données hydrologique :** ensemble de séries temporelles mesurées in-situ regroupées sous forme d'une base de données. Les séries temporelles mesurées in-situ stockées dans la base de données hydrologique sont identifiées par un identifiant unique (la clé primaire) qui dans cette thèse est le code associée à la station de mesure limnimétrique qui a produit la série temporelle mesurée in-situ. Le « code station » est attribué par l'organisme qui gère le(s) réseau(x) de stations limnimétriques. Une base de données hydrologique ne correspond pas nécessairement à un seul bassin hydrologique.

2.1.2 Définitions liées à l'altimétrie radar

Définitions générales

– **Le « range » :** le range est la distance mesurée par l'altimètre entre le satellite et la surface d'eau (ou autre) visée au nadir. Cette distance est calculée à partir de la mesure du temps de trajet aller-retour de l'onde radar : la forme de l'onde radar retournée à l'altimètre est analysée pour estimer au mieux l'instant de fin du trajet aller-retour. La célérité de l'onde est fixée à $c = 3.10^8 \mathrm{m/s}$, cependant un certain nombre de corrections sont calculées afin de prendre en compte les variations de la célérité lors du trajet aller-retour de l'onde dans les différentes couches de l'atmosphère (principalement liées à la ionosphère, la troposphère humide et sèche).

– **Trace :** projection au sol d'une demi-orbite numérotée, ascendante ou descendante. Le terme Trace peut également être employé pour désigner son empreinte au sol : sa largeur et/ou ses limites Est et Ouest.

– **Cycle :** période définie par un ensemble de traces uniques au terme duquel le satellite reprend la même trajectoire.

– **Largeur de trace :** largeur de la projection au sol des endroits où des mesures sont acquises par l'altimètre, selon un axe perpendiculaire à la direction de la trace. Du fait des variations de l'orbite du satellite (de l'ordre de quelques km autour de la trace moyenne), la projection au sol des lieux d'acquisition des mesures permettent de définir la largeur de la trace. Les limites Est et Ouest des traces sont déduites des données, après repérage de cycles dont les mesures se sont le plus écartées de la trace moyenne (cf. fig. 2.2b).

– **Station limnimétrique virtuelle (ou « station virtuelle ») :** site d'acquisition de mesures du niveau d'un cours d'eau obtenues à l'aide des techniques d'altimétrie satellitaire radar nadir. Une station virtuelle est définie - entre autres - par des limites géographiques à l'intersection entre un cours d'eau et une (ou parfois plusieurs) trace(s) de satellite (cf. fig. 2.2c).

Les différents niveaux de données altimétriques

La liste des définitions liées mesures altimétriques est présentée par ordre croissant de granularité des données, de la mesures altimétriques individuelles au produit altimétrique :

– **Mesure altimétrique individuelle :** mesure altimétrique disponible au pas de temps le plus fin dans un produit altimétrique.

– **Mesure altimétrique d'enregistrement :** mesure altimétrique disponible au même pas de temps que l'enregistrement altimétrique qui la contient : la plupart du temps, les mesures altimétriques

(a) Trace 146 du satellite Topex/Poseidon sur l'étang de Vic (Languedoc-Roussillon)

(b) Largeur de la trace 187 de Topex/Poseidon sur le Rhône, au sud d'Arles (entre les limites Est et Ouest)

(c) Stations virtuelles à l'intersection entre le fleuve Madeira (bassin amazonien) et la trace 63 de Topex/Poseidon

FIG. 2.2: Illustration des traces de Topex/Poseidon (a et b) et de quelques stations virtuelles sur le fleuve Madeira (c).

d'enregistrement sont construites à partir de N mesures altimétriques individuelles. Une mesure altimétrique d'enregistrement est toujours accompagnée (dans son enregistrement altimétrique) d'autres informations comme sa date et ses coordonnées d'acquisition, mais aussi d'un certain nombre de mesures géophysiques.

– **Enregistrement altimétrique :** ensemble de variables conditionnées afin de représenter l'état de l'altimètre ainsi que les grandeurs physiques mesurées à un instant donné. En général, les enregistrements altimétriques contiennent chacun un ensemble de variables échantillonnées à 1Hz (voir l'illustration en page 76, fig. 3.2).

– **Série temporelle altimétrique :** ensemble de mesures altimétriques dérivées des mesures acquises au cours du temps en une station virtuelle.

– **Produit altimétrique :** ensemble d'enregistrements altimétriques issus d'une mission d'altimétrie satellitaire radar nadir. Un produit altimétrique est traité, corrigé et conditionné à l'aide de chaînes de traitements complexes. Il contient en général des données à l'échelle mondiale (dans les limites de la couverture définie par l'orbite du satellite) et pour toute la durée de la mission altimétrique. Les produits altimétriques sont fournis par des organismes spécialisés (CNES, NASA, laboratoires, opérateurs, etc.) dans le traitement des données altimétriques. Voir le § 2.3 pour une description technique des produits altimétriques.

– **Série temporelle alti-hydrologique :** série temporelle extraite depuis un produit altimétrique à l'aide d'une station virtuelle (par fenêtrage), puis traitée à l'aide d'une chaîne logicielle de traitements et de transformations (changement de système géodésique, applications de corrections, sélection des mesures altimétriques représentatives, filtrages, etc.).
Les séries temporelles alti-hydrologiques permettent de simplifier l'utilisation de la donnée altimétrique (de par leur forme standardisée et simplifiée) ainsi que son interprétation (information synthétisée). Elles ont en outre la particularité de ne proposer qu'une seule mesure altimétrique par passage du satellite sur la station virtuelle, ce qui permet de préserver au mieux la cohérence hydrologique intrinsèque à la série temporelle.

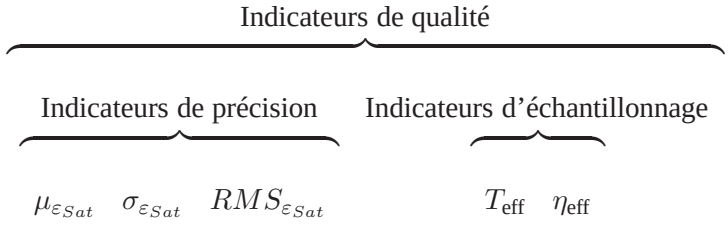
– **Produit alti-hydrologique :** produit hydrologique issu de l'altimétrie radar.
Un produit alti-hydrologique est constitué d'un ensemble de séries temporelles altimétriques optimisées pour une utilisation en hydrologie. Enfin, plusieurs produits alti-hydrologiques peuvent être générés à partir d'un seul et même produit altimétrique, en lui appliquant différentes chaînes de

traitements et de transformations.

2.1.3 Définitions et notations des indicateurs de qualité

Avant d'aborder en détail la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques (cf. chapitre 5), il est nécessaire de définir les « indicateurs de qualité » qui nous permettront de rendre compte des performances des séries temporelles altimétriques.

Nous utilisons deux types d'indicateurs de qualité : (1) des indicateurs de précision des mesures altimétriques du niveau des cours d'eau, et (2) des indicateurs d'échantillonnage des mesures altimétriques. Ces derniers permettent de quantifier la capacité effective de l'altimètre à estimer au moins une mesure altimétrique du niveau de l'eau par passage sur la station virtuelle.



Nous allons voir ci-après à quoi correspondent les cinq termes $\mu_{\varepsilon_{Sat}}$, $\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$, $RMS_{\varepsilon_{Sat}}$, T_{eff} et η_{eff}.

Précisions sur le mot « précision »

Le mot « précision », premier mot du titre de la thèse, a été employé depuis les tous premiers développements de la thèse au sens commun « qualité globale d'une mesure » (cf. dictionnaire Larrousse). Cependant, la notion même de précision est souvent source de confusion. Nous détaillons ici la définition que nous apportons au mot « précision ».

Ces travaux de thèse visent à développer une méthode complète permettant notamment l'analyse des indicateurs de précision, en se basant sur la quantification des écarts (ou erreurs de mesure) entre les mesures altimétriques et les valeurs de référence, les mesures in-situ.

D'après le VIM (Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie), norme française NF X07-001 [AFNOR, 1994] diffusée par l'AFNOR (Association française de normalisation) et transposée depuis une norme ISO (International Organization for Standardization) de 1993, c'est le terme « exactitude » qu'il conviendrait d'utiliser[1]. On y découvre ainsi que le mot « précision » ne fait l'objet d'aucune définition. Mieux, une note dans la définition du mot « exactitude » stipule : « Le terme précision ne doit pas être utilisé pour exactitude ».

Pourtant, aucun des termes proposés dans le VIM ne nous permet de véritablement appréhender ce que nous entendons par « précision des mesures altimétriques » (i.e. la caractérisation de l'exactitude d'un grand nombre de mesures altimétriques). Dans la suite de cette section, nous proposons donc notre propre définition de la « précision des mesures altimétriques », elle est accompagnée d'une définition de « l'incertitude des mesures altimétriques » qui est compatible avec la définition proposée par le VIM[2].

Définitions employées dans mémoire de thèse

– **Erreur des mesures altimétriques :** l'erreur d'une mesure altimétrique du niveau d'un cours d'eau est l'écart entre cette mesure et la valeur réelle du niveau de l'eau. On appelle « série temporelle de l'erreur » la série temporelle des erreurs des mesures altimétriques.

[1] Exactitude : « Étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande ».

[2] Incertitude de mesure : « paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande ».

Pour une série temporelle altimétrique de N échantillons (Z_{Sat}), et N valeurs réelles du niveau des eaux (Z) aux mêmes endroits et aux mêmes instants, l'erreur associée à la $n^{\text{ième}}$ mesure s'écrit :

$$\varepsilon(n) = Z_{Sat}(n) - Z(n) \tag{2.1}$$

– **Précision des mesures altimétriques :** La précision est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ (mesurées ou reconstituées, cf. § 5.2). Elle signifie que la mesure alti-hydrologique est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{is} + \mu_\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon]$, avec :

$$\mu_\varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}\varepsilon(n) \;\; ; \;\; \sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{n=0}^{N}[\varepsilon(n) - \mu_\varepsilon]^2 \;\; ; \;\; RMS_\varepsilon = \left[\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}\varepsilon^2(n)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.2}$$

La précision peut aussi être caractérisée par la valeur RMS (« Root Mean Square », RMS_ε).

– **Incertitude des mesures altimétriques :** L'incertitude est une caractérisation statistique de la distribution de l'erreur entre mesures alti-hydrologiques et valeurs in-situ. Elle signifie que la valeur in-situ est, avec une certaine probabilité, comprise dans l'intervalle $[Z_{Sat} - \mu_\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon]$.

– **Période d'échantillonnage effective :** période d'échantillonnage moyenne d'une série temporelle altimétrique. La période d'échantillonnage effective se calcule à partir du rapport entre la durée de l'horizon de mesure et le nombre de mesures de la série temporelle altimétrique (N_{eff}). Elle est liée à la durée du cycle T_{Sat} et au nombre de cycles N_{Sat} par la relation :

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{Sat}.N_{Sat}}{N_{\text{eff}}} \tag{2.3}$$

où $T_{Sat}.N_{Sat}$ est la durée de l'horizon de mesure.

– **Taux de pertes de mesures :** pourcentage de perte de mesures constaté dans une série temporelle altimétrique, calculé par rapport au nombre de mesures théorique (nombre de passages du satellite). Ce taux s'exprime comme suit :

$$\eta_{\text{eff}} = 1 - \frac{N_{\text{eff}}}{N_{Sat}} = 1 - \frac{T_{Sat}}{T_{\text{eff}}} \tag{2.4}$$

Nous verrons plus tard dans ce chapitre que tous ces indicateurs de qualité peuvent être calculés pour différentes périodes du cycle hydrologique observé. Nous avons en effet défini trois périodes hydrologiques : les périodes de « basses eaux », « moyennes eaux » et de « hautes eaux ». Ce type de découpage nous permettra d'analyser de manière plus fine la structure de l'erreur portée par les mesures altimétriques.

Autres grandeurs utilisées

– **Le coefficient de corrélation (ou coefficient de De Pearson) :** Le coefficient de corrélation, ou coefficient de De Pearson, $r^2(X,Y)$ quantifie la part de variance de la variable Y que l'on peut expliquer à l'aide de la variable X. Il est défini par l'équation suivante :

$$r^2(X,Y) = \frac{\left[\sum (X - \overline{X}).(Y - \overline{Y})\right]^2}{\sum (X - \overline{X})^2 . \sum (Y - \overline{Y})^2} \tag{2.5}$$

Avec $\overline{X}$ et $\overline{Y}$ les valeurs moyennes de X et Y.

– **Erreur résiduelle d'un modèle $\epsilon_{\mathcal{M}}$ (ou résidu) :** L'erreur résiduelle d'un modèle d'estimation $\mathcal{M}_Y$, modèle de la variable Y à partir d'une ou plusieurs variables X, est calculée en comparant la sortie du modèle $\hat{Y} = \mathcal{M}_Y(X)$ avec les vraies valeurs Y. Plus l'erreur résiduelle est faible, meilleur est le modèle :

$$\epsilon_{\mathcal{M}} = \hat{Y} - Y = \mathcal{M}_Y(X) - Y \tag{2.6}$$

2.1.4 Deux approches de la qualité

A partir des indicateurs définis ci-dessus, les performances des séries temporelles altimétriques peuvent être analysées selon deux points de vue différents :

1. l'altimètre, les chaînes de traitements de génération d'un produit altimétrique, puis d'un produit alti-hydrologique fournissent des séries temporelles altimétriques : *« quelle est la capacité d'un altimètre et de ces chaînes de traitements à fournir de la mesure, et avec quelle précision ? »*
2. un cours d'eau présente un certain signal hydrologique en un point donné (série temporelle in-situ), *« quelle est la capacité de la série temporelle altimétrique à restituer le contenu informatif du signal hydrologique ? »*

Ces deux points de vues nous amènent à définir deux notions différentes de « qualité » :

– **Qualité des séries temporelles (altimétriques) au sens altimétrique :** conjonction de la précision et du taux de perte des séries temporelles altimétriques, caractérise l'aptitude du dispositif de mesure à mesurer sa cible. Pour simplifier, nous nommerons cette notion de qualité la « qualité altimétrique ».
– **Qualité des séries temporelles (altimétriques) au sens hydrologique :** conjonction entre la qualité altimétrique et les caractéristiques propres au signal observé, caractérise l'aptitude d'un produit altimétrique à représenter le signal hydrologique observé. Pour simplifier, nous nommerons cette notion de qualité la « qualité hydrologique ».

2.1.5 Récapitulatif des notations

Voici la liste des principales notations utilisées dans ce mémoire de thèse :

Séries temporelles continues

x abscisse curviligne le long d'un cours d'eau. L'abscisse curviligne trouve son origine à l'océan et croît à mesure que l'on s'en éloigne.

$Z(t)$ série temporelle continue du niveau réel d'un cours d'eau en fonction du temps t (en un endroit donné).

$Z(x)$ niveau continu d'un cours d'eau en fonction de l'abscisse curviligne x (pour un instant t fixé).

$Z(x,t)$ représentation bidimensionnelle du niveau d'un cours d'eau continu, en fonction du temps t et de l'abscisse curviligne x. Permet de représenter le niveau du cours d'eau en tout point x, et pour tout instant t.

Séries temporelles discrétisées (échantillonnées)

Note : $X(n)$ désigne la $n^{\text{ème}}$ mesure de la série temporelle X.

Z_{Mis} série temporelle mesurée in-situ composée d'un nombre fini de mesures in-situ (échantillons).

Z_{Ris} série temporelle in-situ reconstituée (à l'aide d'une technique d'estimation du niveau du cours d'eau) composée d'un nombre fini de mesures in-situ.

Z_{Sat} série temporelle altimétrique composée d'un nombre fini de mesures altimétriques individuelles.

ε_{Sat} série temporelle de l'erreur des mesures altimétriques composée de N valeurs d'erreur de mesure.

$\widetilde{\varepsilon}_{Sat}$ série temporelle de l'erreur approximée des mesures altimétriques composée de N valeurs d'erreur de mesure, constuite par comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$\varepsilon_{sat_{Ris}}$ $= \widetilde{\varepsilon}_{Sat}$, autre notation de l'erreur approximée des mesures altimétriques.

ε_{Rec} série temporelle de l'erreur des mesures in-situ reconstituées composée de N valeurs d'erreur de mesure, constuite par comparaison à des mesures in-situ.

ε_{Mis} série temporelle de l'erreur des mesure in-situ composée de N valeurs d'erreur de mesure, par comparaison au niveau réel du cours d'eau Z.

Indicateurs de précision

$\mu_{\varepsilon_{Sat}}$ valeur moyenne de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$\sigma_{\varepsilon_{Sat}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$RMS_{\varepsilon_{Sat}}$ valeur RMS de l'erreur réelle des mesures d'une série temporelle altimétrique.

$\mu_{\varepsilon_{sat_{Mis}}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\sigma_{\varepsilon_{sat_{Mis}}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$RMS_{\varepsilon_{sat_{Mis}}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\mu_{\widetilde{\varepsilon}_{Sat}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$\sigma_{\widetilde{\varepsilon}_{Sat}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$RMS_{\widetilde{\varepsilon}_{Sat}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures d'une série temporelle altimétrique résultant d'une comparaison à des mesures in-situ reconstituées.

$\mu_{\varepsilon_{Mis}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$\sigma_{\varepsilon_{Mis}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$RMS_{\varepsilon_{Mis}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures in-situ (par rapport au niveau réel Z).

$\mu_{\varepsilon_{Rec}}$ valeur moyenne de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$\sigma_{\varepsilon_{Rec}}$ écart-type (non-biaisé) de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

$RMS_{\varepsilon_{Rec}}$ valeur RMS de l'erreur des mesures in-situ reconstituées résultant d'une comparaison à des mesures in-situ.

Indicateurs d'échantillonnage

T_{is} période d'échantillonnage d'une série temporelle mesurée in-situ.

T_{Sat} périodicité de l'orbite du satellite, elle est égale à la période d'échantillonnage théorique d'une série temporelle altimétrique (dans le cas où une seule trace est exploitée sur un station virtuelle).

T_{eff} période d'échantillonnage effective d'une série temporelle altimétrique.

η_{eff} taux de pertes de mesures constaté dans une série temporelle altimétrique, par comparaison à la période d'échantillonnage effective théorique T_{Sat}.

Paramètres de caractérisation des séries temporelles in-situ reconstituées et d'appariement des mesures altimétriques

η_d : taux de disponibilité des mesures d'une série temporelle mesurée in-situ ou série temporelle in-situ reconstituée sur l'horizon d'une série temporelle altimétrique.

N_{CA} : nombre de cycles hydrologiques continus (périodes de 12 mois consécutifs) effectivement disponibles pour l'analyse de l'erreur.

$\mathcal{I}_H$: indice d'homogénéité de la réparition des mesures in-situ reconstituées dans l'année calendaire.

$\widetilde{N}_{CA}$: nombre équivalent de cycles hydrologiques annuels disponibles pour l'analyse de l'erreur.

M_a : nombre de mesures altimétriques appariées.

η_a : taux d'appariement des mesures altimétriques.

Autres grandeurs

δ_t : décalage horaire à appliquer aux dates des mesures in-situ pour travailler en heures UTC.

2.2 Sources de données terrestres utilisées dans cette thèse

De nombreuses sources de données sont nécessaires pour mener à bien le processus de quantification de la qualité des mesures altimétriques dans le cas du suivi du niveau des cours d'eau. En effet, les mesures altimétriques doivent être comparées à une réalité de terrain, celle-ci nous est fournie à l'aide des mesures in-situ collectées par des stations limnimétriques.

Avant de pouvoir comparer les mesures altimétriques aux mesures in-situ, plusieurs étapes de localisation géographique, de traitement et de transformation des données (in-situ et altimétriques) sont nécessaires. En effet, la comparaison entre mesures implique une correspondance entre les mesures altimétriques et in-situ à la fois dans le temps (dates des mesures différentes) et dans l'espace (lieux de mesures différents), nous parlons d'appariement des mesures.

La plupart de ces opérations nécessitent la connaissance de certains paramètres géographiques, géophysiques et temporels.

Dans cette section, nous faisons le point sur les données que nous avons utilisées.

2.2.1 Données géographiques

Représenter et délimiter les eaux continentales

Plusieurs outils de représentations cartographiques couplés à des bases de données peuvent être utilisés pour localiser et délimiter les zones d'eaux continentales qui nous intéressent.

Les données SWBD Les données SWBD (pour « SRTM[3] Water Body Dataset ») fournissent les contours d'une très grande partie[4] (entre les latitudes 56° S et 60° N) des îles, lacs, et cours d'eau du monde. Ces données sont distribuées gratuitement par la NASA[5], par dalles de 1° de côté (fichiers ZIP) dans un format propriétaire mais décrit (Shapefile de ESRI) qui le rend exploitable sur un grand nombre de plateformes informatiques. Enfin les délimitations géographiques des données SWBD sont

[3] SRTM pour « Shuttle Radar Topography Mission »

[4] Selon Wikipedia.org : *« Iles : les îles d'une surface inférieure à 14400 m^2 sont représentées si au moins 10% de leur relief dépasse une hauteur de 15 m par rapport au niveau de l'eau les entourant. Les lacs : les lacs (le niveau de l'eau est identique sur toute leur étendue) ayant une longueur supérieure ou égale à 600 m et une largeur supérieure ou égale à 183 m, les bras sont représentés jusqu'à une largeur de 90 m. Les cours d'eau (représentation par double tracé figurant leur largeur) : Les cours d'eau ayant une largeur supérieure à 183 m sur une longueur d'au moins 600 m. Représentés jusqu'à ce que leur largeur soit inférieure ou égale à 90 m, si celle-ci ne dépasse pas à nouveau cette valeur dans le kilomètre suivant leur cours. »*

[5] ftp ://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SWBD/

référencées dans le système WGS84/EGM96 que nous avons privilégié dans nos travaux. Notons que ce type de données s'exploite généralement dans un logiciel de type SIG (Système d'Information Géographique) mais peut également être exploité dans de nombreux logiciels intégrant un module de lecture de fichiers au format Shapefile.

GoogleEarth Le logiciel GoogleEarth, est distribué gratuitement par la société Google. Il permet de visualiser le globe terrestre dans son ensemble, en trois dimensions, sous la forme d'un assemblage d'images aériennes et satellites de résolutions variables (quelques centimètres à quelques dizaines de mètres).

Les avantages -dans notre cas- de GoogleEarth par rapport à un logiciel SIG sont dans l'ergonomie qu'il propose puisqu'il permet à la fois de travailler sur un « fond cartographique » global et précis tout en proposant une interface souple, rapide et ne nécessitant pas de connaissances expertes. Il est possible d'ajouter, dans l'espace tridimensionnel du globe terrestre, un certain nombre de primitives géoréférencées comme des points, lignes, assemblages de lignes, polygones, mais aussi des images et objets tridimensionnels. L'import de ses objets géographiques se fait via le format de fichiers KML, décrit[6] et dérivé du format XML.

GoogleEarth est disponible pour les systèmes d'exploitations les plus répandus : Windows, MacOS et Linux. Ces deux derniers points font de GoogleEarth un logiciel interopérable et adapté à nos besoins, notamment pour le fenêtrage des données altimétrique sur les cours d'eau (définition des stations virtuelles).

Le logiciel GoogleEarth s'est montré le plus pratique pour notre utilisation et a été utilisé pour de nombreuses tâches liées à cette thèse.

Remarque sur la cohérence entre les données SWBD et les images GoogleEarth : Si l'on importe les données SWBD (nécessite une conversion du format ShapeFile vers le format KML) dans GoogleEarth, il est alors possible de comparer les contours des cours d'eau qui sont proposés par ces deux jeux de données. Une constatation remarquable est la très bonne correspondance entre leurs contours respectifs, constatée sur plusieurs grands fleuves du bassin amazonien (Negro, Solimoes, Amazone). Ces deux jeux de données ne devraient pas, a priori, si bien se correspondre puisque :

- les données SWBD sont issues de la mission SRTM (d'une précision relative) et d'un algorithme de détection des zones d'eau (écoulement des eaux dans un bassin versant, suivi des thalwegs, lits des cours d'eau, repérage de lacs),
- les images GoogleEarth sont des prises de vues aériennes ou satellites acquises à des dates abitraires.

Le fait que ces données se correspondent si bien laisse présager que les images présentes dans GoogleEarth ont été choisies pour représenter au mieux les cours d'eau, dans leur configuration sinon « moyenne », hors périodes d'inondations.

Représentation géographique des sites des mesures altimétriques

Une des tâches nécessaires à la quantification de la qualité des séries temporelles altimétriques est la définition du fenêtrage des stations virtuelles qui leur donnent naissance. Ce travail doit s'effectuer sur un fond de carte relativement précis, permettant de représenter les contours des cours d'eau (utilisation de GoogleEarth dans notre cas) ainsi que les sites où sont acquises les mesures altimétriques. Bien entendu, les mesures altimétriques sont acquises sous la trace du satellite, mais la notion de trace reste floue car bien que les orbites puissent être très précisément connues, il n'en reste pas moins que la trace résultante au sol est caractérisée par une certaine dispersion autour de la trace moyenne[7].

[6] Le format KML est en permanente évolution, se référer à la page web *http://code.google.com/apis/kml/documentation/docIndex.html* pour en savoir plus.

[7] Les orbites peuvent être pertubées par différents phénomènes (tels que les frottements en haute atmosphère, etc.), mais restent déterminées avec une bonne précision, surtout pour les missions altimétriques récentes.

Extraction des trajectoires à partir des données altimétriques Le moyen le plus fiable pour projeter les orbites des satellites au sol est l'extraction des coordonnées exactes des mesures directement depuis les produits altimétriques.

Cette tâche peut s'avérer fastidieuse voire irréalisable pour les utilisateurs non-avertis. En effet, la lecture des formats des produits altimétriques nécessite en général un lourd développement logiciel, ce qui est en soit une première barrière d'accès à ces informations. Néanmois, puisque des outils de lecture ont été implémentés pendant cette thèse, ils ont été utilisés pour extraire les coordonnées des mesures pour des cycles entiers[8].

L'extraction de mesures altimétriques dans une large fenêtre au niveau de l'équateur permet de se rendre compte de la dispersion de la trace et de répérer les mesures des cycles dont les traces s'écartent le plus de la trace moyenne. Un bref passage en revue permet de désigner des cycles dont les traces se sont le plus écartées vers l'Est et vers l'Ouest de la trace moyenne.

FIG. 2.3: Les mesures altimétriques à 10Hz (points jaunes) collectées par Topex/Poseidon sur la période 1992-2002 permettent de désigner les cycles dont les mesures sont les plus éloignées de la trace moyenne. L'assemblage de ces cycles (incomplets) permet d'obtenir deux cycles complets représentant les limites Est et Ouest des trace de Topex/Poseidon. L'exemple illustre ici les limites de la trace 63. (Image GoogleEarth).

Sachant que les cycles de mesures sont systématiquement incomplets (mesures manquées, périodes de maintenance et pannes des satellites, etc.), un assemblage de plusieurs cycle permet de constituer l'équivalent de deux cycles entiers : l'un contenant les traces des limites Est et l'autre les traces des limites Ouest. La projection de ces deux cycles sur un fond cartographique peut alors être utilisée afin de délimiter de manière très précise les limites de traces réelles d'un satellite, permettant ainsi de définir les fenêtres d'extraction des stations virtuelles, aux intersections avec des cours d'eau.

La figure 2.3 illustre l'extraction des traces limites Est et Ouest pour la trace 63 de Topex/Poseidon. La figure 2.4 illustre la couverture des traces ainsi extraites pour le satellite Topex/Poseidon sur sa première orbite (1992-2002).

Fichiers TLE Les fichiers texte au format TLE (de l'anglais : « Two Line Elements ») décrivent, à l'aide de six variables (disposées sur deux lignes et trois colonnes, d'où le nom « TLE ») les paramètres nécessaires à la définition des orbites des satellites qui nous intéressent. Les fichiers TLE sont régliérement mis à jour et délivrés sur des sites web spécialisés, notamment par des communautés d'amateurs en observations astrophysiques. Des logiciels permettent alors de représenter les orbites en deux ou trois dimensions. L'utilisation de ce moyen de représentation pose cependant plusieurs problèmes : un fichier TLE est mis à jour de manière à représenter au mieux l'orbite d'un satellite pour une période donnée et peut donc être peu précis pour nos applications. De plus, aucun logiciel permettent la représentation cartographique des fichiers au format TLE et permettant l'import d'autres sources d'informations géographiques se sont montrés efficaces pour le travail de définition des fenêtres d'extractions des stations virtuelles.

2.2.2 Données géodésiques

De manière à pouvoir travailler de concert avec des données provenant de sources diverses (position des stations limnimétriques, traces satellitaires, mesures altimétriques, fenêtrage géoréférencé, etc.), il a été nécessaire de choisir un système géodésique de référence permettant de ramener ces données à un

[8]Un cycle entier peut contenir jusqu'à 8,5 et 54,4 millions de mesures respectivement pour Topex/Poseidon et ENVISAT.

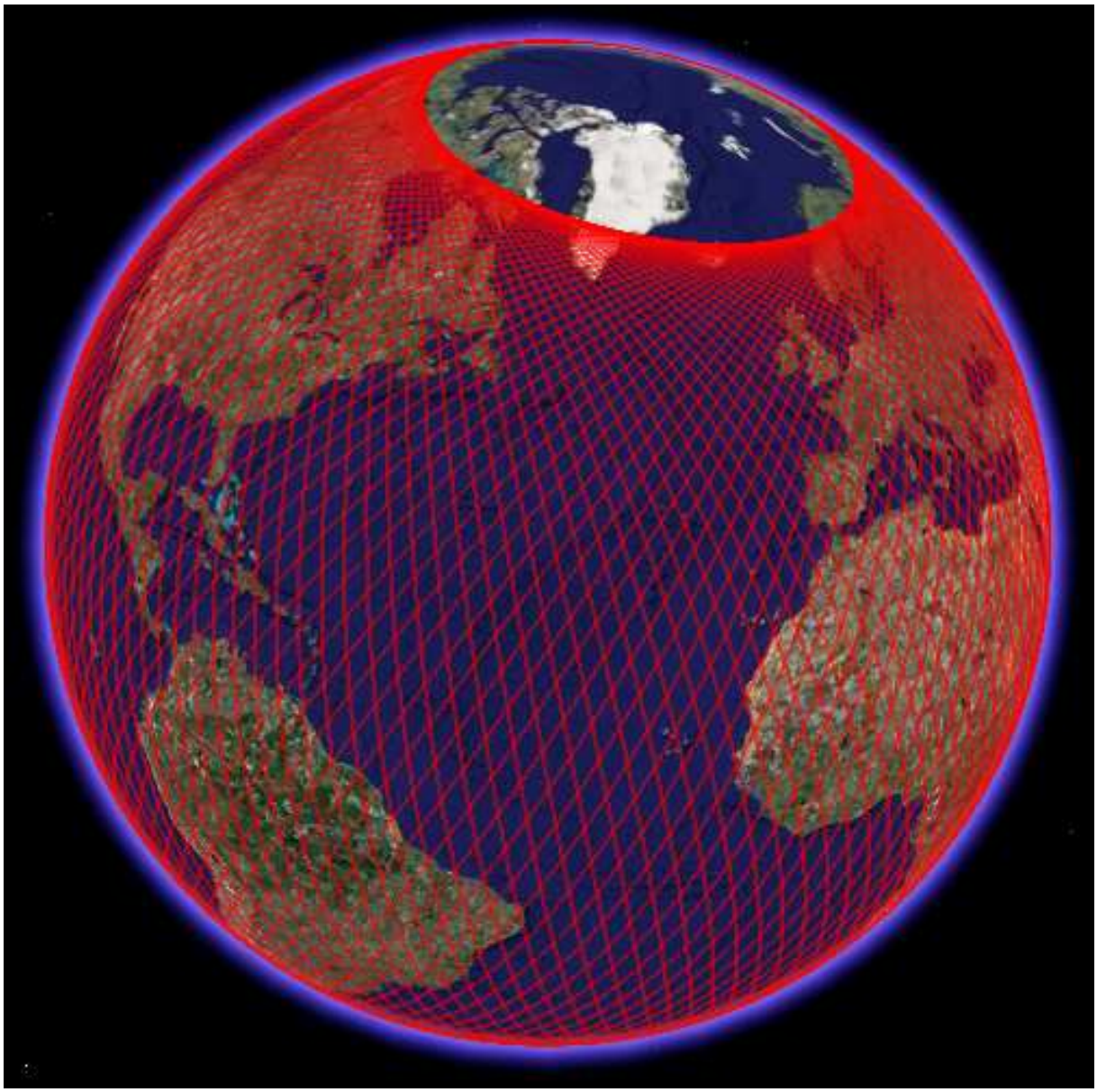


FIG. 2.4: Illustration de l'extraction depuis le produit altimétrique AVISO/M-GDR des coordonnées d'un cycle complet (ses 254 traces différentes) pour le satellite Topex/Poseidon. Les traces ascendantes sont numérotées par des numéros impairs, trouvent leur origine dans l'hémisphère sud et se terminent dans l'hémisphère nord ; les traces descendantes sont numérotées par des numéros pairs, trouvent leur origine dans l'hémisphère nord et se terminent dans l'hémisphère sud. (Image GoogleEarth).

même référentiel géographique dans lequel nous allons positionner toutes les données géographiques à utiliser ; et un système géoïdal permettant de mesurer les altitudes dans un même référentiel de potentiel de gravité et notamment de s'assurer de la cohérence hydraulique par l'estimation du sens des pentes d'écoulement des eaux. Nous avons donc choisi d'une part le système géodésique WGS84 comme système de coordonnées $[latitude; longitude]$, et d'autre part le modèle de géoïde EGM96 pour le nivellement des altitudes en Z.

WGS84 Le sytème géodésique mondial WGS84 (World Geodetic System, révision de 1984) est fréquement utilisé comme référence, notamment par les systèmes GPS et le logiciel GoogleEarth que nous avons utilisé. Les paramètres de l'ellipsoïde de WGS84 sont :

$$\left| \begin{array}{l} \text{Demi axe majeur} = 6378137,0\text{m (ou 6378,137km)} \\ \text{Applatissement} = 1/298.257223563 \end{array} \right. \tag{2.7}$$

Modèles géodésiques des missions altimétriques La plupart des missions satellitaires altimétriques définissent leur propre système géodésique. L'utilisation des données altimétriques va donc nécessiter un changement de référentiel géodésique avant de pouvoir être utilisées dans un référentiel commun.

EGM96 EGM96 est un modèle d'équipotentialité gravimétrique de la Terre qui s'ajuste au mieux (au sens des moindres carrés) au niveau moyen des océans. Il est modélisé par une série de coefficients d'harmoniques sphériques jusqu'à l'ordre 360.

Nous utilisons le modèle EGM96 à partir d'un fichier de type « grille » d'une résolution de 15 arcsecondes contenant les élévations du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence WGS84. Nous pouvons ainsi calculer par interpolation, à partir de cette grille et pour chaque coordonnée $(latitude, longitude)$, la hauteur du géoïde associée. La méthode d'interpolation retenue est de type bicubique comme cela est préconisé par [Kidner et al., 1999].

Notons qu'un calculateur de la hauteur du géoide EGM96 est disponible en ligne[9], il a permis de valider la méthode d'interpolation que nous avons implémentée.

2.2.3 Données hydrologiques

Afin de pouvoir quantifier la qualité des mesures altimétriques, une comparaison systématique entre les mesures des séries temporelles altimétriques et les mesures des séries temporelles in-situ est mise en œuvre. Nous considérons donc ces mesures in-situ comme notre réalité de terrain. Les séries temporelles mesurées in-situ sont obtenues grâce aux mesures relevées par des stations de mesures limnimétriques, implantées au sein d'un réseau hydrométrique, le long des cours d'eau.

Modes d'acquisition des mesures in-situ

Les modes d'acquisition des mesures de terrain sont de plusieurs natures. Il existe des appareils limnimètres automatisés qui relèvent et stockent les mesures à un pas de temps régulier et/ou programmé.

D'autres stations de mesures sont confiées à des opérateurs qui ont la tâche de relever une ou plusieurs fois par jour le niveau de l'eau par lecture de l'échelle limnimétrique, et de reporter ces mesures sur un cahier de relevés. Les cahiers de relevés sont ensuite collectés et assemblés pour constituer une base de données du niveau des cours d'eau.

Imperfections des mesures in-situ

Les mesures du niveau des cours d'eau acquises aux stations limnimétriques présentent un certain nombre d'imperfections que nous énumérons ici de manière non exhaustive :

[9] Le calculateur de la hauteur du géoide EGM96 est disponible en ligne à l'adresse suivante : http ://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html

– **Précision :** La précision des mesures in-situ est de l'ordre de quelques centimètres et peut varier selon les techniques utilisées (opérateur lisant une valeur sur une échelle ou système de mesure à filtrage de l'effet des petites vagues).

– **Collecte des mesures et délais :** Sur certains bassins, le temps d'acheminement et d'intégration de nouvelles mesures au sein d'une base de données peut prendre plusieurs mois. Dans le cas du bassin amazonien par exemple, une bonne partie des stations limnimétriques sont isolées des principales infrastructures de transport (certaines voies d'eau naturelles connaissent des périodes d'étiage qui les rendent impratiquables), les déplacements pouvant donc être longs, difficiles, voire dangereux.

– **Lacunes de mesures :** Du fait de ces possibles difficultés d'acheminement, il arrive que des cahiers de relevés soient perdus, les séries temporelles concernées sont alors incomplètes (trouées). Dans d'autres cas, les mesures peuvent parfois tout simplement être impossibles à relever (inondation importante, étiages pour lesquels le niveau d'eau passe en dessous du zéro de la dernière échelle graduée, etc.). Enfin, on peut constater ici et là que certaines lacunes dans les séries temporelles mesurées in-situ sont compensés par interpolation « manuelle », ce qui semble révéler l'indisponibilité temporaire de l'opérateur.

– **Nivellement altimétrique non systématique :** Un problème que l'on rencontre sur des réseaux hydrométriques très étendus est l'absence de nivellement topographique des limnimètres. Généralement ceci se produit lorsque le réseau de nivellement du ou des pays est incomplet, voire erroné. Les données des stations limnimétriques non nivelées ne permettent donc a priori qu'une comparaison relative avec les mesures altimétriques. C'est le cas de la quasi totalité des stations de mesures du bassin amazonien. Nous verrons un peu plus tard comment le nivellement d'une centaine de stations limnimétriques du bassin amazonien a été établi (cf. § 2.2.3).

– **Echantillonnage temporel approximatif :** Dans le cas d'un relevé effectué par un opérateur, il parait légitime de se demander quelle peut être la qualité de l'échantillonnage : l'opérateur est-il ponctuel ? Une ou deux mesures par jour suffisent-elles à échantillonner correctement le signal hydrologique ?

Les mesures in-situ utilisées dans cette thèse

Bassin amazonien Les données collectées par les stations limnimétriques in-situ du bassin amazonien, gérées par l'ANA, ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la Méthode Standard de Quantification de la Qualité des Produits Alti-Hydrologiques. Le bassin amazonien de par ses dimensions, sa variété de configurations hydrologiques, les dimensions de ses fleuves et la disponibilité de ses données in-situ est un terrain très favorable au développement des techniques d'altimétrie radar pour le suivi des eaux continentales.

– **Fournisseur de mesures du niveau des cours d'eau :** ANA[10] (Agência Nacional de Águas). Projet Hybam[11].
– **Echantillonnage :** Journalier (2 mesures par jour à 7h00 et 17h00 moyennées pour construire une mesure à 12h00).
– **Couverture spatiale :** 302 stations limnimétriques (dont 206 sur lesquelles sont également réalisées des mesures de débit) réparties sur le bassin amazonien, mais seulement 72 de ces stations sont nivelées par rapport au niveau des moyen océans ([Kosuth et al., 2006], [Kosuth et al., 2008]). Cependant, si l'on s'intéresse au taux de données disponibles pour une période donnée, ces chiffres diminuent. Ainsi par exemple, pour la première orbite de Topex/Poseidon (septembre 1993 à août 2002), seulement 183 stations non nivelées et 60 stations nivelées fournissent des mesures pour au moins 75% de la durée de la mission (voir la carte des stations limnimétriques du bassin, fig. 2.6).

[10] http ://www.ana.gov.br/
[11] http ://www.mpl.ird.fr/hybam/

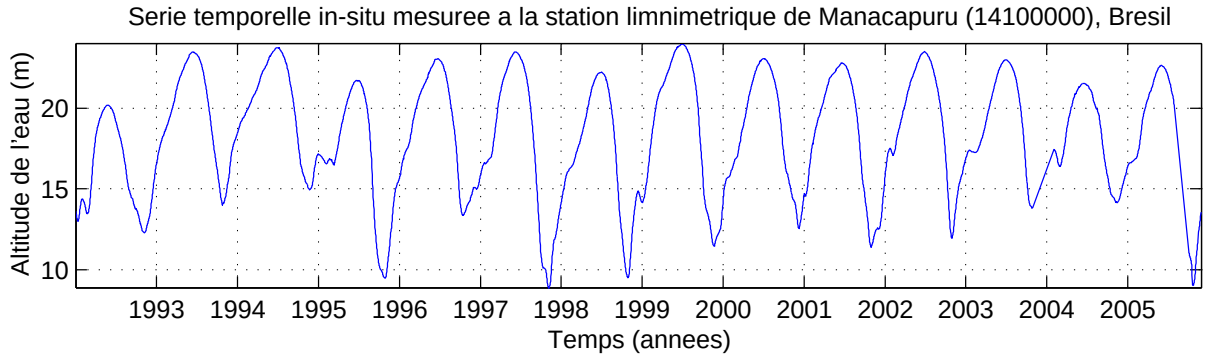


FIG. 2.5: Exemple de série temporelle mesurée in-situ (échantillonnage journalier) obtenue à la station limnimétrique de « Manacapuru (14100000) », au Brésil, sur le réseau de mesure de l'ANA.

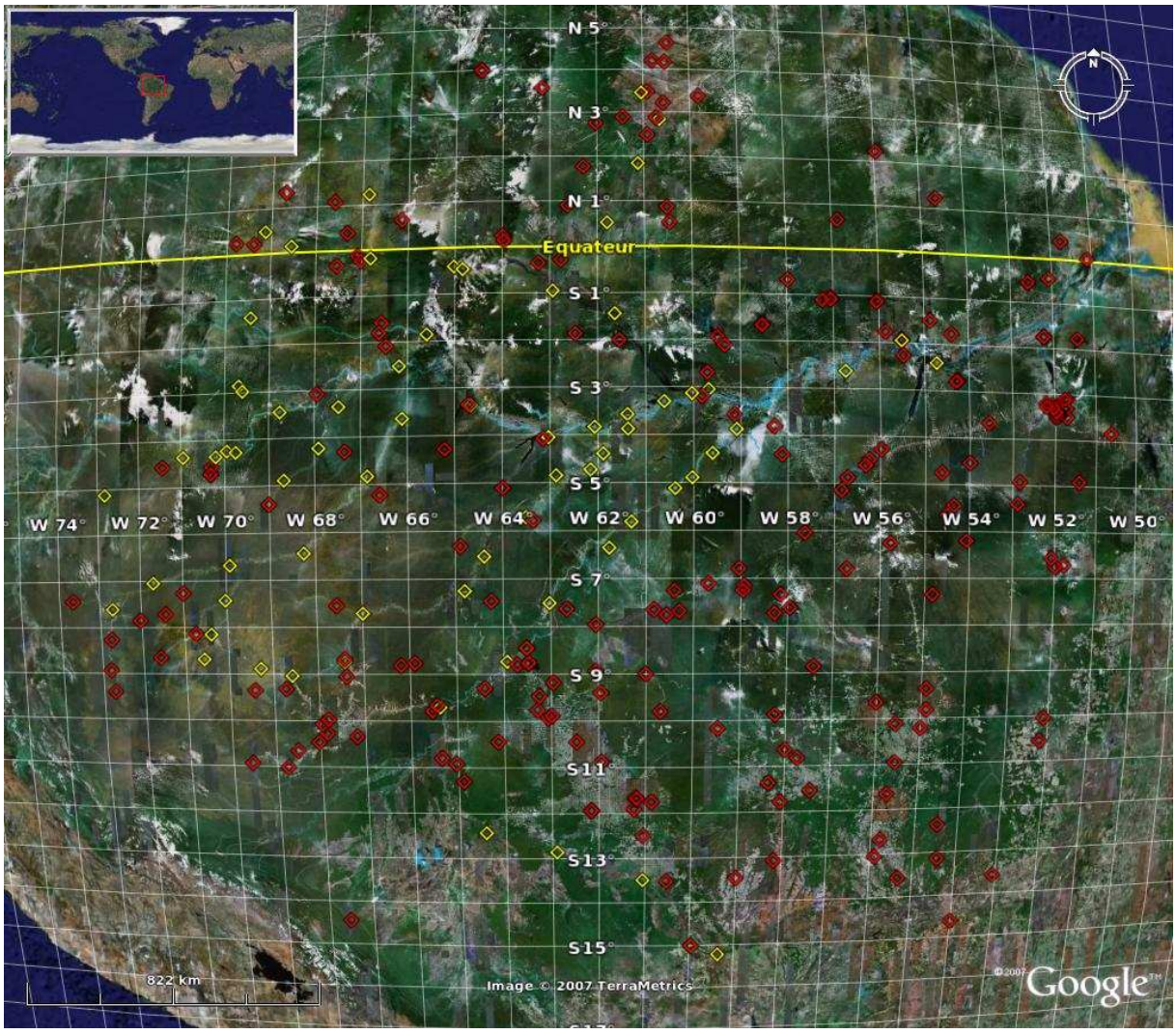


FIG. 2.6: Carte des 302 stations limnimétriques du bassin amazonien (Brésil) fournissant des mesures de niveaux des cours d'eau (losanges rouges). Seuls les losanges jaunes représentent des stations limnimétriques dont l'altitude du zéro de l'échelle est nivelé par rapport au niveau des moyen océans (98 en tout, voir [Kosuth et al., 2006]).

Nivellement altimétrique des stations limnimétriques du bassin amazonien Le nivellement de 98 stations limnimétriques a été établi par Kosuth et al. ([Kosuth et al., 2006], [Kosuth et al., 2008]) sur la base des mesures altimétriques fournies par Topex/Poseidon (produit AVISO/M-GDR + correction de troposphère humide recalculée, cf. § 1.2.2) et de campagnes de mesures GPS. Les mesures altimétriques de Topex/Poseidon ont été utilisées pendant leur période de hautes eaux où elles sont en très bonne adéquation, à un biais près que l'on recherche, avec les mesures in-situ.

Ce travail de nivellement s'appuie sur la quantification des maxima locaux annuels du niveau des eaux mesurés par altimétrie radar aux stations virtuelles. Pour chaque année, la connaissance des maxima annuels en divers points d'un cours d'eau (abscisse curviligne) permet de reconstruire, par une technique d'interpolation, le profil de l'enveloppe supérieure annuelle de la ligne d'eau. Il est alors possible de connaître le niveau annuel atteint en tout point du cours d'eau et notamment aux stations limnimétriques in-situ. En comparant, pour une station limnimétrique et une année donnée, la hauteur de l'enveloppe supérieure annuelle avec la valeur maximale annuelle mesurée à cette station, on obtient une valeur de nivellement altimétrique du zéro de l'échelle. En répétant cette opération pour toutes les années de données disponibles à la station, on obtient une estimation plus précise du nivellement altimétrique.

Notons que la méthode d'interpolation entre stations mise en œuvre utilise une interpolation polynômiale avec une contrainte de minimisation de l'énergie du profil[12].

Enfin, le lecteur pourrait être surpris de constater que des données altimétriques ait été utilisées pour corriger des données in-situ que nous avons par ailleurs comparé à des données altimétriques ! Effectivement, cela peut paraître absurde, mais le nivellement des stations limnimétriques, même dans un référentiel altimétrique relatif (celui de Topex/Poseidon dans notre cas) permet de représenter des profils de ligne d'eau à un instant donné. Le nivellement des stations limnimétriques dans un référentiel altimétrique quelconque mais commun est une nécessité pour la mise en œuvre de la Méthode de Reconstitution des Séries Temporelles In-Situ présentée au § 5.2 du chapitre 5.

2.3 Sources de données altimétriques utilisées dans cette thèse

Il existe une très grande gamme de produits issus de l'altimétrie radar : chaque mission altimétrique, mise en place pour des besoins et objectifs sensiblement différents, a embarqué différents types de capteurs spécialisés pour telle ou telle mesure : hauteur des eaux et des vagues, vitesse du vent, temps de propagation des ondes dans l'atmosphère (bandes C, K_u, etc.), etc.

2.3.1 Généralités concernant sur les produits altimétriques

Les produits altimétriques (défini au § 2.1.2) sont fournis pour différents niveaux d'interprétation des mesures acquises par les différents capteurs. Les produits dits de « niveau 1 », communément appelés SGDR (de l'anglais : « Sensor Geophysical Data Records ») sont, comme leur nom l'indique, très proches du capteur et de la technique de mesure. Ils sont donc principalement destinés à des utilisateurs experts. Des produits de niveau 1-intermédiaires permettent d'accéder notamment aux formes d'ondes radar tout en proposant d'autres grandeurs d'un niveau d'interprétation plus élaboré.

Enfin, les produits de niveau 2 sont pleinement utilisables dans le cadre de ces travaux de thèse (sous seule contrainte de lecture des formats spécifiques) : ils ne contiennent plus les formes d'ondes radar, mais l'estimation du range associé. Ces produits contiennent également un certain nombre de grandeurs physiques dont de multiples corrections instrumentales, atmosphériques et géophysiques qui sont indispensables pour atteindre le niveau de précision requis par l'altimétrie radar appliquée au suivi des cours d'eau.

[12] Revient à minimiser le carré de la dérivée seconde de $Z(x, t_N)$, le niveau du cours d'eau Z à l'instant $t = t_N$ fixé (instant du maximum annuel), selon le profil curviligne x. Cette technique d'interpolation est décrite au § 5.2.

D'une manière générale, ces produits proposent un compromis entre le temps de traitement nécessaire à leur génération et leur niveau d'interprétation et de précision, notamment en ce qui concerne le calcul des orbites. Les produits de niveaux 1-intermédiaires permettent une utilisation en quasi temps-réel (délais de quelques heures à quelques jours), alors que les produits de niveau 2 sont disponibles après plusieurs semaines de traitements. Ils bénéficient parfois de révisions et d'amélioration grâce à l'amélioration des chaînes de traitements et des modèles employés (modèles météo, calcul de corrections, etc.).

Le présent travail de thèse est consacré à la caractérisation de la qualité des produits altimétriques et à ce titre nous n'avons pas généré de nouveau produit[13], ni amélioré de produit existant. Nous avons essentiellement utilisé des produits altimétriques de « niveau 2 » (fournis par de grands organismes comme le CNES), ainsi que des produits alti-hydrologiques (fournis par différents groupes de recherche : base de données HydroWeb du LEGOS, projets CASH et « River and Lake »). La liste de produits utilisés dans cette thèse est proposée plus loin dans cette section, à la page 65.

Structure des produits altimétriques

Les produits altimétriques, aussi dénommés GDRs (pour « Geophysical Data Record ») sont organisés en dossiers, à raison d'un dossier par cycle. Chacun de ces dossiers contient des fichiers de traces, à raison d'un fichier par trace, et facilement repérable par son numéro. Les fichiers de traces contiennent la totalité des enregistrements altimétriques (ou géophysiques) acquis pendant la durée d'opération du satellite sur cette trace, pour le cycle en question. Les enregistrements altimétriques sont aussi appelés SDR (pour « Scientific Data Record »).

Les enregistrements altimétriques contiennent les variables qui nous intéressent pour le suivi des eaux continentales : mesures du range et altitude du satellite, dates et coordonnées des mesures altimétriques, corrections instrumentales et géophysiques, etc. D'autres variables géophysiques dédiées au suivi des océans (ou autres applications) sont également présentes dans les enregistrements altimétriques mais ne nous serons a priori pas utiles. La figure 2.7 schématise l'organisation des produits altimétriques.

Les enregistrements altimétriques décrivent en général une mesure qui est en fait la moyenne de plusieurs mesures acquises à un pas de temps plus fin (les mesures altimétriques individuelles) , mais contiennent toutefois de quoi les reconstituer partiellement, ce point est abordé en détail dans la section 3.4.

Structure des produits alti-hydrologiques

Les produits alti-hydrologiques sont simplement constitués d'une série de fichiers, à raison d'un fichier par série temporelle altimétrique, et donc par station virtuelle. Les formats utilisés sont généralement des formats standards qui rendent leur utilisation aisée, citons notamment les formats : fichiers texte à colonnes séparées (fichiers .csv), XML[14] (pour "eXtensible Markup Language"), NetCDF[15]. La plupart du temps, les fichiers d'un produit alti-hydrologique se limitent à ne fournir que le strict minimum permettant de représenter les séries temporelles : les dates et les valeurs du niveau des cours d'eau.

Comment obtenir des produits altimétriques ou alti-hydrologiques

Il existe de nombreux produits altimétriques et de nombreux moyens de les obtenir, néanmoins, nous avons regroupé ici un certain nombre de pistes susceptibles d'éclairer le lecteur :

[13] Ainsi que nous n'avons pas mené de travaux sur le traitement des formes d'onde radar (techniques dites de « retracking », permettant d'estimer les valeurs de range).

[14] Voir notamment : *http://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language*

[15] Le format NetCDF est un format auto descriptif. On peut trouver de nombreux outils de lecture gratuits sur le site officiel : *http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/*.

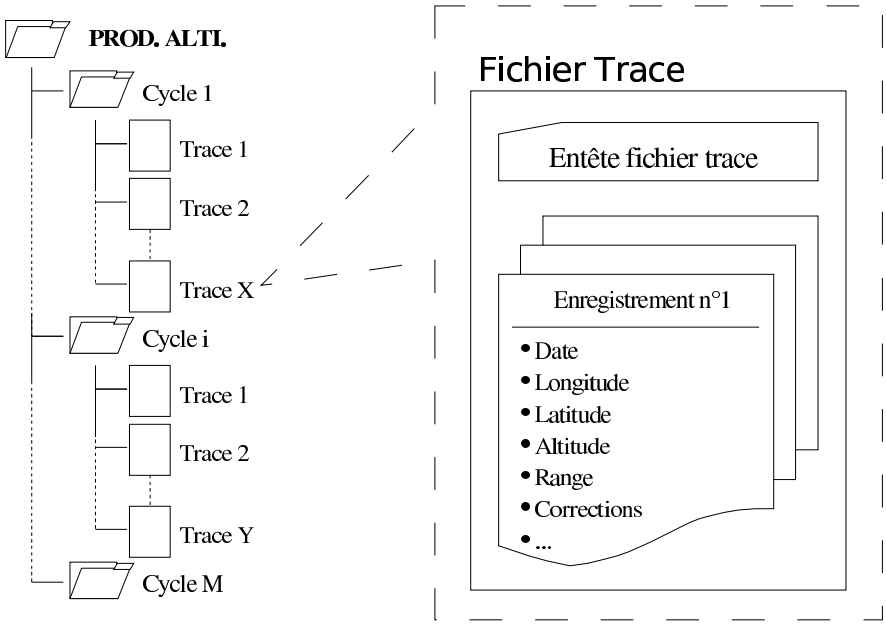


FIG. 2.7: Illustration schématique de la structure des fichiers constituant un produit altimétrique. Les produits altimétriques sont généralement délivrés sous forme de CD/DVD-Rom ou accessibles en téléchargement par serveur FTP.

AVISO Les produits AVISO (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques) sont accessibles par le biais de divers moyens dont un serveur FTP ou un abonnement aux CD ou DVD des produits altimétriques.

– **Site web :** *http://www.jason.oceanobs.com/*. Le site web AVISO propose un catalogue des données issues de l'altimétrie satellitaire radar. Ce catalogue décrit succinctement les produits, leurs périodes de diffusion ainsi que les différents supports ou modes de distributions possibles.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté pour l'abonnement aux M-GDRs Topex/Poseidon délivrés sous forme de CD-Rom pour la période 1993-2002 et sous forme de DVD-Rom (contenant également les GDRs Jason-1) pour la période 2002 à nos jours. Depuis la fin 2005, les DVD-Rom ne contiennent plus que des GDRs Jason-1 puisque Topex/Poseidon a été mis hors service et placé sur une orbite « cimetière ».

CLS Les produits altimétriques CLS (Collecte Localisation Satellites) issus du retracking des formes d'ondes de Topex/Poseidon ont été obtenus dans le cadre d'une collaboration entre l'UMR TETIS et CLS et n'est pas distribué publiquement.

– **Site web :** *http://www.cls.fr/*

CASH Le produit alti-hydrologique CASH (Contribution de l'Altimétrie Spatiale à l'Hydrologie) a été généré par CLS dans le cadre du projet CASH, à partir du produit altimétrique CLS que nous traitons également dans cette thèse. Les données disponibles concernent uniquement la mission altimétrique Topex/Poseidon.

– **Site web :** *http://ocean.cls.fr/cash*

HydroWeb Le produit alti-hydrologique HydroWeb est élaboré par l'équipe GOHS (Géodésie, Océanographie et Hydrologie Spatiales) du LEGOS (Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales). Le site internet d'HydroWeb permet de télécharger des séries temporelles alti-hydrologiques du niveau de fleuves, zones d'inondation, lacs et réservoirs acquises sur la plupart des grands bassins fluviaux du globe. Les données disponibles concernent principalement les missions altimétriques Topex/Poseidon et ENVISAT.

– **Site web :** *http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/*

River & Lake Les produits alti-hydrologiques « River & Lake Hydrology » sont issus du travail mené dans le cadre du projet « River & Lake » (ESA). Ils sont construits à partir des formes d'onde des missions altimétriques ERS-2 et ENVISAT extraites sur un échantillon de stations virtuelles sur quelques grands fleuves du globe. Ces formes d'ondes sont retraitées (« retrackées ») par un système expert qui intègre une douzaine d'algorithmes de retracking spécialisés [Berry et al., 1997]. Chacun des deux produits alti-hydrologiques fournit des séries temporelles, chacune issue d'une mission altimétrique sur une station virtuelle. Ces produits sont partiellement disponibles sur le site Web de l'ESA[16] et peuvent être obtenus sur demande en format ASCII ou XML[17].

- **Site web :** *http://earth.esa.int/riverandlake/*
- **Serveur FTP :** *ftp://styx.esrin.esa.it/pub/apm/riverandlake/*

Autres ressources sur les produits altimétriques

D'autres ressources liées à l'altimétrie satellitaire radar sont disponibles notamment sur internet :

- Le site web *http://www.altimetry.info/* qui est un condensé de ce qui se fait aujourd'hui en altimétrie radar
- La Toolbox BRAT (pour BRAT : « Basic Radar Altimetry Toolbox ») qui est une boîte à outils permettant de manipuler et de traiter les données issues de nombreux produits altimétriques. BRAT est un logiciel libre disponible pour les systèmes Windows et Linux,et téléchargeable gratuitement sur le site web cité ci-dessus.
- Un tutoriel de trois-cent pages « Radar Altimetry Tutorial » [Rosmorduc et al., 2006] qui contient d'intéressantes informations sur l'altimétrie satellitaire radar nadir et ses applications.

2.3.2 Les produits altimétriques utilisés dans cette thèse

Différentes sources de données altimétriques ont été utilisées pendant cette thèse, ce qui a permis dans un premier temps de travailler sur plusieurs jeux de données, de façon à généraliser et à assurer la robustesse et la généricité de la méthode de quantification de la qualité des séries temporelles altimétriques.

Voici une liste détaillée, produit par produit, des données altimétriques que nous avons utilisées. Les produits sont désignés par la notation suivante : **« Fournisseur - mission(s) altimétrique(s) - format »**

Pour chaque produit, les points « Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales » et « Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique » décrivent la configuration du produit utilisée :

- Le point « Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales » décrit les corrections qui sont appliquées au range afin de le corriger : des variations de célérité dans les différentes couches de l'atmosphère et des perturbations instrumentales. Toutes les corrections utilisées sont celles qui sont fournies dans les produits altimétriques ; elles ne sont pas appliquées par défaut à la valeur du range qui est fournie. Ce point permet donc de faire le bilan des corrections du range que nous avons choisi d'utiliser.
- Le point « Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique » décrit les critères de rejets des mesures individuelles lors de la lecture des produits altimétriques. Les noms des variables employés ici sont ceux qui sont utilisés dans les manuels utilisateurs respectifs des produits altimétriques.

AVISO - Topex/Poseidon - M-GDR

- **Fournisseur :** CNES/AVISO (ou NASA/PODAAC).
- **Mission(s) :** Topex/Poseidon.

[16] Voir *http://earth.esa.int/riverandlake/*.

[17] Nous n'avons pas eu accès au format XML du produit décrit dans la documentation [RLH, 2006].

- **Type :** Produit altimétrique.
- **Organisation & format des fichiers :** M-GDR (texte/binaire). Un sous-dossier par cycle, contenant chacun un fichier par trace.
- **Période de disponibilité :** septembre 1993 à novembre 2005 (changement d'orbite en août 2002).
- **Couverture :** Globale ($\pm 66°$ en latitude).
- **Orbite(s) :** TPa/J1/J2 (ou TP), TPb.
- **Périodicité des cycles :** 10 jours (9,9156 jours exactement).
- **Nombre de traces :** 254.
- **Ellipsoïde de référence :** Demi-axe majeur $= 6378136.3$m ; aplatissement $= 1/298,257$.
- **Géoïde fourni :** EGM96, mais seulement pour des mesures moyennées à 1Hz.
- **Fréquence des mesures :** 10Hz le long de la trace.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales :**
  - les corrections instrumentales sont intégrées par défaut dans les valeurs de range mesurées
  - correction de troposphère sèche (Dry_Corr, ordre de grandeur : $2.308m \pm 0.004m$)
  - les corrections suivantes n'ont pas été appliquées par manque de disponibilité : troposphère humide (Wet_Corr), marrée solide (H_Set)
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique :**
  - H_Alt_H(i)=valeur par défaut (32767)
  - Sat_Alt_H(i)=valeur par défaut (32767)
  - Nval_H_Alt=0
  - Sigma0_K=valeur par défaut (65535) ou Sigma0_K>7.0dB
  - Filtrage global (avec $K = 3$) sur les variables H_Alt et Sat_Alt
- **Commentaires :** Le manuel d'utilisateur [AVI, 1996], indispensable à l'exploitation de ce produit, décrit en détail la structure des fichiers des M-GDRs et les variables qui y sont enregistrées.

CLS - Topex/Poseidon - « ENVISAT-L2 »

- **Fournisseur :** CLS (Collecte Localisation Satellites)
- **Mission(s) :** Topex/Poseidon.
- **Type :** Produit altimétrique.
- **Organisation & format des fichiers :** Format de fichiers de type « Envisat L2 » (texte/binaire). Un dossier par bassin, un dossier par cycle, un fichier par trace.
- **Période de disponibilité :** septembre 1993 à août 2002.
- **Orbite(s) :** TPa/J1/J2.
- **Périodicité des cycles :** 10 jours (9.9156 jours exactement).
- **Couverture :** Découpée en bassins fluviaux (Amazone, Congo, Danube, Fleuve Jaune, Gange, La Plata, Lena et Mékong).
- **Nombre de traces :** 254.
- **Ellipsoïde de référence :**
- **Géoïde fourni :** N.C.
- **Fréquence des mesures :** 10Hz le long de la trace.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales :**
  - utilise les correction recalculées pour l'occasion à partir des modèles de l'ECWMF[18] [Mercier et Zanife, 2006].
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique :**
  - Sélection des variables dont le coefficient de rétrodiffusion est compris dans la plage : $\sigma_0 \in [0.0; 100.0]$, σ_0 étant exprimé en (10^{-2}dB).
- **Commentaires :** Ce produit est issu d'un travail mené par CLS dans le cadre du projet CASH. Il présente l'originalité de reprendre les formes d'ondes radar de Topex/Poseidon, traitées à l'aide du segment sol de la mission ENVISAT. Ce produit est particulièrement intéressant car il propose quatre interprétations différentes du range, estimées par les quatre algorithmes « Ocean », « Ice1 »,

[18]The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, *http://www.ecmwf.int/*

« Ice2 » et « SeaIce » implémentés dans ce segment sol. Il est conditionné au format des GDRs de la mission altimétrique ENVISAT. Les manuels [ESA, 2006] et [ESA, 2003] décrivent en détail la structure des fichiers et les variables qui sont disponibles dans ce format de produit.

CASH - Topex/Poseidon - NetCDF

- **Fournisseur :** Projet « CASH » (généré par CLS).
- **Mission(s) :** Topex/Poseidon.
- **Type :** Produit alti-hydrologique.
- **Organisation & format des fichiers :** Un fichier décrivant la série temporelle alti-hydrologique par station virtuelle. Format NetCDF (Network Common Data Form).
- **Période de disponibilité :** septembre 1993 à août 2002.
- **Couverture :** Sélection de stations virtuelles sur quelques grands bassins fluviaux.
- **Orbite(s) :** TPa/J1/J2.
- **Périodicité des cycles :** 10 jours (9.9156 jours exactement).
- **Nombre de traces :** Parmi 254 traces : restreint aux choix des stations virtuelles.
- **Ellipsoïde de référence :** mesures non géoréférencées.
- **Géoïde utilisé :** N.C.
- **Fréquence des mesures :** une mesure par cycle.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales :** N.C.
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique :** N.C.
- **Commentaires :** Ce produit alti-hydrologique est un produit dérivé du produit « CLS- Topex/Poseidon- ENVISAT/L2 ».

« River & Lake Hydrology » (River & Lake - ERS-2/ENVISAT - RLH/ASCII)

- **Fournisseur :** « River & Lake », Projet ESA- De Montfort University (E.A.P.R.S. Department) - Lancaster University
- **Mission(s) :** ERS-2 et ENVISAT.
- **Type :** Produits alti-hydrologiques ($\times 2$).
- **Organisation & format des fichiers :** Un fichier par série temporelle alti-hydrologique, une série temporelle par station virtuelle et par trace. Format RLH ASCII.
- **Période de disponibilité :** ERS-2 : 1995-2003, ENVISAT : 2003-2007.
- **Couverture :** Sélection de stations virtuelles définies par le Cemagref (UMR TETIS, N. Bercher et P. Kosuth).
- **Orbite(s) :** ERS2/Envisat
- **Périodicité des cycles :** 35 jours.
- **Nombre de traces :** Parmi 1002 traces : restreint aux choix des stations virtuelles.
- **Ellipsoïde de référence :** mesures non géoréférencées (extractions dans WGS84).
- **Géoïde utilisé :** EGM96.
- **Fréquence des mesures :** une mesure par passage.
- **Corrections utilisées pour la génération du range sur les eaux continentales :** N.C.
- **Critères de rejet des mesures à la lecture du produit altimétrique :** N.C.
- **Commentaires :** Le chaîne de génération « RLH » est appliquée d'une part aux mesures altimétriques issues d'ERS-2 et d'autre part aux mesures issues d'ENVISAT, composant ainsi deux produits alti-hydrologiques distincts. Il existe également un produit altimétrique (donc plus complet) fourni par River & Lake, nommé « RLA » (pour « River & Lake Altimetry ») délivré en format binaire.

Notons que dans le cas des produits altimétriques, l'analyse de la qualité des mesures altimétriques nécessite de procéder à la construction d'un (ou plusieurs) produits alti-hydrologiques. Ceci est opéré à l'aide d'un fenêtrage géographique à la station virtuelle et de l'application de modules de sélection et de filtrage des mesures altimétriques (cf. chapitre 3).

De nombreux produits alti-hydrologiques ont été générés dans le cadre de cette thèse (cf. chapitre 7, section 7.2.2, page 174).

2.3.3 Dénomination des produits alti-hydrologiques, stations virtuelles et séries temporelles altimétriques

Dénomination des produits alti-hydrologiques

Puisque de multiples produits alti-hydrologiques peuvent être générés à partir d'un seul produit altimétrique, il est important de fixer une règle permettant de les nommer.

Le nom d'un produit alti-hydrologique doit comporter :
- le nom du fournisseur du produit altimétrique dont il est issu,
- le nom de format du produit altimétrique,
- le nom de l'algorithme de « (re)tracking » du produit altimétrique (un produit altimétrique peut contenir des valeurs de range issues de plusieurs trackers),
- une suite de sigles permettant d'identifier la chaîne de traitements appliquée aux séries temporelles altimétriques.

Par exemple, pour un produit alti-hydrologique généré à partir du produit AVISO/M-GDR auquel la chaîne suivante a été appliquée, et dans cet ordre :
- critères de sélection des mesures AVISO, sigle « aec » (pour "AVISO Editing Criteria"),
- sélection d'une mesure représentative par passage du satellite, sigle « opp » (pour "One per passage"),
- filtrage global avec $K = 3$, sigle « fg3 » (pour "Filtre Global" avec $K = 3$),
- filtrage calendaire récursif[19] avec $K = 2,5$, sigle « fcr2p5 » (pour "Filtre Calendaire Récursif", avec $K = 2,5$),

sera nommé :

« AVISO/M-GDR/aec-opp-fg3-fcr2p5 »

Généralement, la combinaison d'un nom de fournisseur et d'un nom de produit permet d'identifier la mission altimétrique. Dans l'exemple que nous venons de voir, la mission est « Topex/Poseidon ». Les filtres cités ici en exemple sont présentés au chapitre 3 de ce mémoire.

Dénomination des stations virtuelles

Un produit alti-hydrologique est contitué de multiples séries temporelles altimétriques, chacune ayant été extraite à l'aide d'une station virtuelle, sur un fleuve donné. De même que pour les produits alti-hydrologiques, une règle de dénomination des stations virtuelles a été définie.

Le nom d'une station virtuelle doit contenir :
- un sigle permettant d'identifier l'orbite sous laquelle la station virtuelle se situe,
- le nom de la (les) trace(s) de cette orbite contribuant à la station virtuelle,
- le nom du fleuve sur lequel les mesures altimétriques sont acquises,
- un identifiant permettant de désigner le numéro de l'intersection trace/fleuve, puisque un fleuve peut être intersecté plusieurs fois par une même trace,

Le sigle permettant de désigner une orbite a son importance et ceci pour plusieurs raisons :
- une orbite peut être utilisée par plusieurs missions altimétriques, c'est le cas par exmple de la première orbite de Topex/Poseidon (1993-2002) et l'orbite actuelle de Jason-1 (depuis 2002),

[19] Les deux autres paramètres du filtrage calendaire $\Delta T/2 = 15$ jours et $qT = 1$jour sont considérés comme des constantes dans nos applications, voir § 3.8.2.

– une mission altimétrique peut avoir utilisé plusieurs orbites, c'est le cas par exemple des missions ERS-1 et Topex/Poseidon,

Remarque : Pour chacun des produits altimétriques cités au § 2.3.2 (page 65), la liste des sigles des orbites utilisées par la mission altimétrique concernée est fournie (Voir « Orbite(s) »).

Exemple : Deux stations virtuelles situées à la première et la deuxième intersection entre le fleuve Solimões et la trace 63 de la première orbite de Topex/Poseidon, seront nommées respectivement :

« TP-063A-Solimoes » et « TP-063B-Solimoes »

Dénomination des séries temporelles altimétriques

Enfin, les séries temporelles altimétriques doivent elles aussi être nommées de manière unique au sein du produit alti-hydrologique dont elles font partie.

Le nom d'une série temporelle altimétrique doit comporter les éléments suivants :
– le nom de la station virtuelle où elle a été acquise,
– le nom du tracker utilisé pour l'interprétation du range, puisque la station virtuelle fourni autant de séries temporelles qu'il y a de trackers,

Ainsi, une série temporelle altimétrique issue de la station virtuelle « TP-063B-Solimoes », et mesurée à l'aide du tracker « Ice2 » sera nommée :

« TP-063B-Solimoes-ice2 »

L'appartenance de cette série temporelle altimétrique à un produit alti-hydrologique permet de déterminer la mission altimétrique, le produit et le fournisseur de son produit altimétrique d'origine.